

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Napájení nouzového osvětlení pomocí superkapacitorů

Power supply emergency lighting using by supercapacitors

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Petr Zapletal

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Napájení nouzového osvětlení pomocí superkapacitorů
Power supply emergency lighting using by supercapacitor

Zásady pro vypracování:

1. Používané systémy a svítidla nouzového osvětlení a jejich napájení
2. Superkapacitory - princip funkce, základní parametry a charakteristiky, použití pro napájení svítidla
3. Výpočet velikosti vhodného superkapacitoru a návrh elektronického zapojení svítidla
4. Konstrukce funkčního vzorku nouzového osvětlení napájeného superkapacitory

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Habel, J., Světelná technika. Praha: České vysoké učení technické, 1990.
- [2] Maxwell Technologies - Ultracapacitors [online]. 2011 [cit. 2011-09-26]. Dostupné z WWW: <www.maxwell.com/>.
- [3] Produkty nouzového osvětlení [online]. 2011 [cit. 2011-09-26]. Zumtobel. Dostupné z WWW: <http://www.zumtobel.cz/at/cs/product_f.htm>.
- [4] ČSN EN 50172 - Systémy nouzového únikového osvětlení. Praha : Český normalizační institut, 2005. 16 s.
- [5] CARBOL, Zbyněk. Elektrické světlo: Možnosti napájení nouzového osvětlení pomocí superkondenzátorů, 2011, s. 1-21.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a podklady, ze kterých jsem čerpal.

.....
Bc. Petr Zapletal

V Ostravě.....

Datum odevzdání diplomové práce: 4. května 2012

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Prof. Ing. Karlovi Sokanskému, CSc. a konzultantovi Ing. Tomášovi Novákovi, PhD., za cenné rady a doporučení při vypracovávání této diplomové práce. V neposlední řadě bych také rád poděkoval kolegovi z výzkumného projektu z katedry elektrotechniky Ing. Romanu Hrbáčovi, PhD., za poskytnutí důležitých informací z elektronických technologií při návrhu plošného spoje a studentovi postgraduálního studia na katedře elektroenergetiky Ing. Zbyňkovi Carbolovi za vstřícnost a ochotu při bádání aplikace nabíjecího obvodu superkapacitoru. Touto formou bych rád poděkoval mé nejbližší rodině, zejména rodičům a přítelkyni za obětavou podporu během vysokoškolského studia.

Abstrakt

Napájení nouzového osvětlení pomocí superkapacitorů

Diplomová práce se zabývá konstrukčním řešením a optimalizací návrhu nouzového svítidla napájeného nikoliv prostřednictvím konvenčních akumulátorových článků, jak je běžné, nýbrž pomocí superkapacitorů.

Úvodní část práce přináší náhled do problematiky aktuálně používaných napájecích a osvětlovacích systémů nouzových svítidel v praxi a základní analýzu superkapacitorů a jejich použití. Následující úsek práce je zaměřen na teoretické výpočty, vývoj a testování elementárních částí systému samotného nouzového svítidla napájeného prostřednictvím superkapacitoru. Závěrečná část shrnuje hodnocení prototypu svítidla nouzového osvětlení, především jeho elektrických, světelných měření a dále je využito výpočtového programu pro simulaci a testování prototypu ve světelně-technických parametrech.

Hlavním cílem je přispět do oblasti vývoje nouzového osvětlení napájeného alternativním zdrojem, který s sebou přináší podstatné finanční úspory ve formě provozních nákladů a uvést a zdůraznit významný přínos a vlastnosti chování LED světelných zdrojů ve spojení se superkapacitorem pro použití autonomního nouzového osvětlení jak pro konečného spotřebitele, tak pro životní prostředí.

Klíčová slova

Nouzové osvětlení, nouzové svítidlo, superkapacitor, plošný spoj, ekonomická bilance, energetická bilance, nabíječka, DC/DC konvektor, napájecí zdroj, integrovaný obvod, LED dioda, LED driver, Relux Suite

Abstract

Power supply emergency lighting using by supercapacitors

The diploma thesis deals with the constructional solutions and optimization of a draft emergency luminaire not powered by conventional accumulator cells, as is usual, but with using supercapacitors.

The introductory part brings an insight into the currently used power and illumination systems emergency lighting in practice and basic analysis supercapacitor and their use. The following of the work focuses on theoretical calculations, development and testing of elementary parts of the systems self-contained emergency luminaire by means supercapacitor. The final section summarizes the assessment of prototype emergency luminaire, especially its electrical, lighting measurement and further is used calculation program for simulation and testing of a prototype light-technical parameters.

The main objective is to contribute in the development of alternative-powered source emergency lighting, which brings with it significant financial savings in the form operating costs and state and emphasize the contribution of the behavior and properties of LED lights source in conjunction with supercapacitor for used autonomous emergency lighting for the final consumer and for the environment.

Key words

Emergency lighting, emergency luminaire, supercapacitor, printed circuit, economic balance, energetic balance, charger, DC/DC convector, power supply, integrated circuit, LED diode, LED driver, Relux Suite

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symoly

η_{SYS}	[-]	Účinnost celého systému prototypu nouzového svítidla
η_{LDVR}	[-]	Účinnost LED driveru
η_P	[lm/W]	Měrný výkon původního svítidla Zumtobel
ΔT	[°C]	Okolní teplota prostředí
ΔV	[V]	Dovolený pokles napětí superkapacitoru
ΔU_{IH}	[%]	Pokles napětí vlivem samovybitení po jedné hodině
ΔW_{IH}	[%]	Pokles elektrické energie vlivem samovybitení po jedné hodině
ΔW_{MAX}	[J]	Maximální využitelné množství elektrické energie
Φ	[lm]	Světelný tok
Φ_{ORI}	[lm]	Světelný tok originálního světelného zdroje firmy Zumtobel
$\Phi_{MAX_1:40}$	[lm]	Maximální světelný tok v poměru 1:40
$\Phi_{MAX_1:40,2,5}$	[lm]	Maximální světelný tok v poměru 1:40 pro montážní výšku 2,5 m
$\Phi_{MAX_1:40,3}$	[lm]	Maximální světelný tok v poměru 1:40 pro montážní výšku 3 m
$\Phi_{MAX_1:40,3,5}$	[lm]	Maximální světelný tok v poměru 1:40 pro montážní výšku 3,5 m
Φ_{225}	[lm]	Světelný tok zdroje ve velikosti 225 lm
dU	[V]	Změna napětí superkapacitoru
dt	[s]	Časový krok
i	[A]	Proud superkapacitoru
h	[m]	Montážní výška nad úrovní podlahy
k	[-]	Činitel stárnutí superkapacitoru
t	[min]	Požadovaná doba svícení prototypu nouzového svítidla
t_D	[min]	Doba vybíjení superkapacitoru z napětí U_0 na napětí U_F
$t_{SVI(S)}$	[s]	Teoretická doba svícení s původním světelným zdrojem
$t_{SVI(M)}$	[min]	Teoretická doba svícení s původním světelným zdrojem
A	[m ²]	Osvětlovaná plocha
A_{FOT}	[m ²]	Osvětlovaná plocha při měření na goniofotometru
C	[F]	Obecná kapacita superkapacitoru
C_I	[F]	Kapacita jednoho superkapacitoru
C_P	[F]	Kapacita dvou superkapacitorů v paralelním zapojení
C_S	[F]	Kapacita dvou superkapacitorů v sériovém zapojení

E	[lx]	Osvětlenost
$E_{POŽ}$	[lx]	Minimální požadovaná osvětlenost středové osy
E_{VYP}	[lx]	Experimentálně určená minimální osvětlenost středové osy
$E_{0,0°}$	[lx]	Osvětlenost měřené roviny 0° a úhlového intervalu 0°
$E_{0,5°}$	[lx]	Osvětlenost měřené roviny 0° a úhlového intervalu 5°
I_{AGV}	[A]	Průměrný odebíraný proud ze superkapacitoru
I_C	[A]	Vybíjecí proud superkapacitoru
I_{CHRG}	[A]	Naprogramovaný nabíjecí proud superkapacitoru
I_{LED}	[A]	Napájecí proud výkonové LED diody
I_{MAXS}	[cd]	Maximální svítivost svítidel
I_{MAX}	[A]	Maximální proud odebíraný proud ze superkapacitoru
I_{OUT}	[A]	Výstupní proud LED driveru
P_{MAX}	[W]	Maximální příkon výkonové LED diody
P_{ORI}	[W]	Maximální příkon originálního světelného firmy Zumtobel
P_1	[W]	Výkon
P_2	[W]	Příkon
R_A	[-]	Index podání barev
R_{CEL}	[Ω]	Celkový vnitřní sériový ekvivalentní odpor superkapacitoru
R_{FB1}	[Ω]	První rezistor výstupního odporového děliče inteligentní nabíječky
R_{FB2}	[Ω]	Druhý rezistor výstupního odporového děliče inteligentní nabíječky
R_{KUS}	[ks]	Počet použitých kusů superkapacitoru
R_{KUSP}	[Ω]	Rezistivita superkapacitorů v paralelním zapojení
R_{KUSS}	[Ω]	Rezistivita superkapacitorů v sériovém zapojení
R_{PF1}	[Ω]	První rezistor vstupního odporového děliče inteligentní nabíječky
R_{PF2}	[Ω]	Druhý rezistor vstupního odporového děliče inteligentní nabíječky
R_{PROG}	[Ω]	Externí rezistor programující nabíjecí proud superkapacitoru
U_C	[V]	Vybíjecí napětí superkapacitoru
U_F	[V]	Napětí na superkapacitoru 5 sekund po odpojení zátěže
U_{ESRMAX}	[V]	Maximální úbytek napětí na superkapacitoru
U_{LED}	[V]	Napětí na výkonové LED diodě
U_{MIN}	[V]	Minimální využitelné napětí na superkapacitoru s připojenou zátěží
U_P	[V]	Napětí superkapacitorů v paralelním zapojení
U_S	[V]	Napětí superkapacitorů v sériovém zapojení

U_0	[V]	Počáteční napětí nabitého kondenzátoru
U_{ESR}	[V]	Úbytek napětí na vnitřním ekvivalentním odporu
V_{FB}	[V]	Velikost zpětnovazebního napětí inteligentní nabíječky
V_{IN}	[V]	Vstupní napětí LED driveru
V_{INN}	[V]	Vstupní napětí inteligentní nabíječky
V_{OUTN}	[V]	Výstupní napětí inteligentní nabíječky
V_0	[V]	Velikost napětí na superkapacitoru v čase $t = 0$ [min]
V_{IH}	[V]	Velikost napětí na superkapacitoru v čase $t = 60$ [min]
W_P	[J]	Naakumulovaná energie dvou superkapacitorů v paralelním zapojení
W_S	[J]	Naakumulovaná energie dvou superkapacitorů v sériovém zapojení
W_0	[J]	Velikost elektrické energie na superkapacitoru v čase $t = 0$ [min]
W_{IH}	[J]	Velikost elektrické energie na superkapacitoru v čase $t = 60$ [min]
W_{IK}	[J]	Naakumulovaná energie jednoho superkapacitoru

Zkratky

ČSN	Česká technická norma
ESR	Ekvivalentní sériový odpor
DC	Stejnosměrný proud
GPS	Globální družicový polohový systém
GND	Uzemnění
I/O	Integrovaný obvod
LED	Light emitting diode
Ni-Fe	Nikl-železný
Li-ion	Lithium-iontový
Li-Pol	Lithium-polymerový
NiCd	Nikl-kadmiový
NiMH	Nikl-metal hydridový
Pb	Olověný
PC	Osobní počítač
PDA	Osobní digitální pomocník
SMD	Součástka pro povrchovou montáž plošných spojů
UPS	Nepřerušitelný zdroj elektrického napájení

Obsah

1. ÚVOD	2
2. NOUZOVÉ OSVĚTLENÍ.....	4
2.1. DRUHY NOUZOVÉHO OSVĚTLENÍ.....	4
2.2. POŽADAVKY Kladené NA SOUSTAVY NOUZOVÉHO OSVĚTLENÍ.....	5
2.3. SVÍTIDLA A SVĚTELNÉ ZDROJE POUŽÍVANÉ V NOUZOVÉM OSVĚTLENÍ.....	9
2.4. SOUČASNĚ POUŽÍVANÉ SYSTÉMY NAPÁJENÍ NOUZOVÉHO OSVĚTLENÍ.....	15
3. NAPÁJENÍ PROTOTYPU NOUZOVÝCH SVÍTIDEL SUPERKAPACITOREM	21
3.1. POPIS STRUKTURY A VLASTNOSTÍ SUPERKAPACITORU	22
3.2. ZJIŠTĚNÉ VÝHODY POUŽITÍ SUPERKAPACITORU V ZÁLOŽNÍCH SYSTÉMECH	25
3.3. DEGRADAČNÍ VLIV PARAMETRŮ NA SUPERKAPACITOR	27
3.4. VÝPOČET KAPACITY SUPERKAPACITORU PRO ZÁLOŽNÍ ZDROJ NOUZOVÉHO SVÍTIDLA	31
4. PROTOTYP NOUZOVÉHO SVÍTIDLA NAPÁJENÉHO SUPERKAPACITOREM.....	34
4.1. NÁVRH A VÝROBA ELEKTRONICKÉ ČÁSTI PROTOTYPU NOUZOVÉHO SVÍTIDLA	34
4.2. VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE NABÍJECÍHO A NAPÁJECÍHO OBVODU	36
4.3. SIMULAČNÍ POSLOUPNOST PROCESU VYBÍJENÍ SUPERKAPACITORU	37
4.4. KONSTRUKCE NABÍJECÍHO OBVODU SUPERKAPACITORU	39
4.5. TESTOVÁNÍ A MĚŘENÍ INDUKČNOSTÍ PRO NAPÁJECÍ OBVOD	44
4.6. PLÁN ÚDRŽBY NA PROTOTYPU SAMOSTATNÉHO SVÍTIDLA	46
5. HODNOCENÍ PROTOTYPU NOUZOVÉHO SVÍTIDLA NAPÁJENÉHO SUPERKAPACITOREM..	48
5.1. SVĚTELNÁ MĚŘENÍ.....	48
5.2. ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ	52
5.3. NÁVRH NOUZOVÉ OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY S PROTOTYPEM NOUZOVÉHO SVÍTIDLA	55
5.4. POROVNÁNÍ PROTOTYPU A KONVENČNÍHO NOUZOVÉHO OSVĚTLENÍ.....	59
6 ZÁVĚR	63
ODKAZY POUŽITÉ LITERATURY, OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ Z VNĚJŠÍCH ZDROJŮ.....	66
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ UVEDENÝCH V DIPLOMOVÉ PRÁCI.....	70
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK UVEDENÝCH V DIPLOMOVÉ PRÁCI	72
SEZNAM PŘÍLOH.....	73

1. Úvod

V závěrečném ročníku magisterského studia na katedře elektroenergetiky se mi naskytla příležitost absolvovat diplomovou práci na téma: „Napájení nouzového osvětlení pomocí superkapacitorů“. Předmětem této práce je vývoj návrhu a konstrukčního řešení prototypu samostatného nouzového svítidla vybaveného výkonovou LED diodou a napájeného alternativním napájecím akumulacním zdrojem nové generace – superkapacitorem, který se jeví jako adekvátní nástupce konvenčního způsobu akumulace a odběru elektrické energie. Rozsah této práce se rovněž zabývá vývojem elektronických obvodů, které řídí, regulují a ovládají procesy spojené s napájecími a nabíjecími a indikačními segmenty. Celkové zhodnocení prototypu bude probíhat na základě experimentálních analýz a testování jednotlivých elementů, ze kterých se prototyp nouzového svítidla skládá.

Počátky vývoje LED světelných zdrojů sahají až 40 let do minulosti, ačkoli v posledních letech procházejí prudkým vývojem z hlediska zvyšování hodnot měrných výkonů. Stabilizace kvantitativních i kvalitativních parametrů je předpokládána na konci tohoto desetiletí. Momentální použitá technologie LED výroby dosahuje měrných výkonů 160 lm / W. Očekávanou vizí do budoucna je dosažení výrobního technologického maxima s měrnými výkony okolo 225 lm / W. LED technologie tedy vytvářejí stále markantnější prostor pro jejich využití ve srovnání s klasickými světelnými zdroji.

V dnešní době plné technických pokroků a inovací je z hlediska světelné techniky obecně opomíjenou částí umělých osvětlovacích soustav systém nouzového osvětlení, u kterého lze díky velkým měrným výkonům světelných zdrojů (výkonové LED) aplikovat nestandardní záložní napájecí zdroje – superkapacitory. Spojení výkonové LED technologie a superkapacitoru jako rezervního zdroje se jeví jako ideální pro aplikaci nouzového osvětlení z hlediska pravidelných provozních nákladů, protože degradace jednotlivých komponentů s relativně málo častým spínáním je zanedbatelná.

S použitím superkapacitoru jako napájecího zdroje nouzového osvětlení, odpadají pro všechny budoucí uživatele prototypu pravidelné výměny elektrochemických napájecích záložních zdrojů a údržba zařízení, jako je tomu u konvenčních nouzových svítidel v pravidelných čtyřletých výměnách, které ukládá norma ČSN EN 1838. Na nákladech za údržbu provozovatel osvětlovací soustavy evidentně ušetří, protože výrobcem daná doba života u superkapacitoru je minimálně 10 let.

Se zvyšující se cenou pracovní činnosti, zvláště klesne-li cena superkapacitorů, má toto řešení do budoucna veliký potenciál. Akumulační kapacita superkapacitorů v dnešní době dosahuje velikostí, které jsou dostačující pro energeticky náročnější aplikace. Proto je úspěšné absolvování tohoto tématu mne velká výzva.

Obecně je nouzová osvětlovací soustava funkčně sofistikovaný soubor prvků (tj. svítidla, světelné zdroje, elektrické rozvody a ovládací, indikační, napájecí a monitorovací systémy) tvořící ucelené zařízení, které svým výstupním prvkem - světelným zdrojem generuje v případě nouzového stavu v osvětlovaném prostoru požadované světelné prostředí pro bezpečné opuštění prostoru. Úroveň osvětlení v prostoru je závislá na vlastnostech, stavu a rozmístění nouzových svítidel.

Při výpočtových a projekčních metodách podle normy nemůže být uvažováno s nepřímými odrazy uvažovaného nouzového prostředí (úniková cesta, protipanický prostor, náhradní osvětlení a osvětlení prostorů s velkým rizikem).

Hlavním požadavkem nouzového systému je zajištění dostatečné úrovně intenzity osvětlení a vhodných podmínek pro vidění, rovněž i určení směru na únikových cestách a na zvláštních místech. Patříčný důraz je kladen také na zajištění snadného dosažení a použití protipožárních či bezpečnostních opatření. Při řešení návrhu systému nouzového osvětlení je důležité vzít v úvahu další požadavky (realizační, provozní, technologické a estetické) upravující do značné míry světelně-technické parametry.

Projektování a navrhování nouzových osvětlovacích soustav vnitřních prostorů je spojeno s celou řadou světelně-technických výpočtů. Správné dimenzování nouzových osvětlovacích systémů vede ke snížení investičních i provozních nákladů na osvětlení. Kalkulací se dosáhne:

- stanovení dostatečného jmenovitého výkonu pro jmenovitý chod nouzových svítidel
- celkový počet světelných zdrojů a svítidel, tj. celkový instalovaný příkon pro nouzové osvětlení uvažovaného prostoru
- energeticko-ekonomické dimenzování napájecích zdrojů
- ověření jakostních parametrů v navržené nouzové osvětlovací soustavě

Nouzová osvětlovací soustava má v případě ztráty napájecího napětí splňovat požadavky na spolehlivé osvětlení prostoru, který se nachází v nouzovém režimu a má zabezpečit správné vnímání řešeného vnitřního prostoru a odpovídající subjektivní vnímání interiéru.

Systémy nouzového osvětlení tvoří malou část celkové umělé osvětlovací soustavy, ať už svým rozsahem nebo finančním objemem. Patří k velmi důležitým prvkům celé této soustavy z hlediska evakuace, bezpečnosti lidských životů a ochrany majetku.

Ve většině případů jsou systémy nouzového osvětlení opatřeny autonomním zdrojem (vlastní náhradní zdroj, předřadník, elektronické ovládání a indikace stavu), zřídka centrálním napájecím systémem. Nouzová svítidla musí podle normy vyzařovat světelnou energii minimálně 1 hodinu, případně i více (2, 3 hodiny) podle typu osvětlovaného prostředí (nemocnice, frekventované chodby obchodních řetězců). [1], [5], [9], [14], [35]

2. Nouzové osvětlení

Nouzové osvětlení je obecně využíváno v situacích, kdy normální osvětlení vypoví svůj stabilní provozní stav. Nouzové napájení je vyvedeno ze záložních akumulačních zdrojů, nezávislých na normálních zdrojích elektrické energie (rozvodné soustavy).

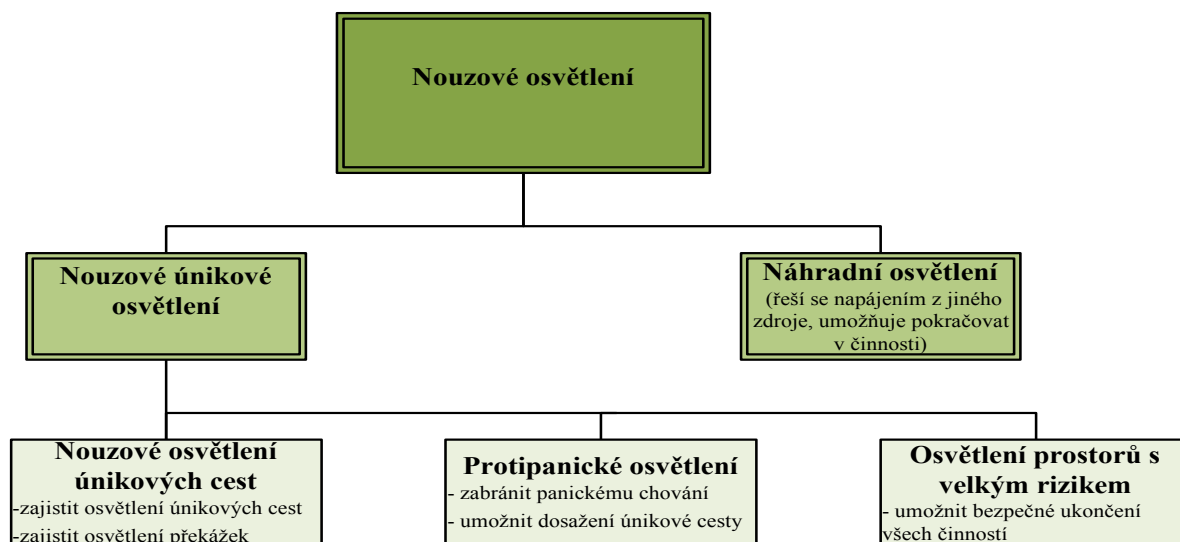
Požadavky kladené normou ČSN EN 1838 na části systémů nouzových svítidel jsou minimální a platí pro celé vymezené období a konec projektovaného života zařízení. Minimální hodnota intenzity osvětlení je měřena a zpracovávána bez příspěvku odraženého světelného toku.

Mezi nejdůležitější aspekt nouzového osvětlení patří bezpečný odchod potencionálně ohrožených osob při výpadku normálního osvětlení. [9], [10]

2.1. Druhy nouzového osvětlení

Základní aspekt nouzového osvětlení je uplatňován v případech nouze, kdy selže funkce normálního osvětlení. V těchto abnormálních situacích je vždy hlavním požadavkem ochrana lidí a jejich bezpečná evakuace z prostorů, které se dočasně nebo trvale staly nebezpečnými.

Nouzové osvětlení se podle normy ČSN EN 1838 dělí na náhradní osvětlení a nouzové únikové osvětlení. To je dále členěno na nouzové osvětlení únikových cest, protipanické osvětlení a osvětlení prostorů s velkým rizikem. [2], [9]



Obr. 1: Blokové schéma druhů nouzového osvětlení [9]

2.1.1. Náhradní osvětlení

V technické praxi funguje jako přímá náhrada normálního osvětlení a umožňuje pokračovat v běžné činnosti bez významných omezení. V případě nižšího osvětlení vyvíjeného náhradním osvětlením než u minimálního normálního osvětlení, je nutné použít výhradně pro přerušení nebo dokončení činností.

Použije-li se náhradní osvětlení pro nouzové únikové osvětlení, musí splňovat rozhodující požadavky této normy. [2], [9], [10]

2.1.2. Nouzové únikové osvětlení

Základním účelem nouzového únikového osvětlení je vytvoření dostatečné intenzity osvětlení pro bezpečný odchod z prostorů při výpadku normálního napájení. [9], [10]

2.1.2.1. Nouzové osvětlení únikových cest

Funkcí nouzového osvětlení únikových cest je umožnění osobám v ohrožení bezpečný odchod z prostoru poskytnutím vhodných podmínek pro vidění a určení směru na únikových cestách a na zvláštních místech a zajistit snadné dosažení a použití protipožárních a bezpečnostních zařízení. Nouzové osvětlení únikových cest není navrženo k tomu, aby umožňovalo pokračovat v běžné činnosti v provozních nebo obytných prostorech při výpadku normálního nebo náhradního osvětlení. [2], [9], [10]

2.1.2.2. Protipanické osvětlení

Hlavním požadavkem protipanického osvětlení (veřejných prostorů) je eliminace pravděpodobnosti vzniku paniky a vytvořit přijatelné prostředí pro bezpečný pohyb směrem k únikovým cestám poskytnutím vhodných podmínek pro vidění a určení směru. Natočení svítidel nouzových osvětlení na únikových cestách a ve veřejných prostorech má být řešeno směrem dolů k pracovní srovnávací rovině. Norma Světlo a osvětlení – Nouzové osvětlení definuje osvětlenost všech překážek vyšších, než 2m nad pracovní srovnávací rovinou. [2], [9], [10]

2.1.2.3. Nouzové osvětlení prostorů s velkým rizikem

Základním účelem nouzového osvětlení prostorů s velkým rizikem je zvýšení možné bezpečnosti lidí při potencionálně nebezpečných procesech nebo situacích. Systémy nouzového osvětlení prostorů s velkým rizikem jsou konstruovány pro řádné ukončení veškerých činností uskutečňovaných pro bezpečnost ostatního osazenstva v daném místě. [2], [9], [10]

2.2. Požadavky kladené na soustavy nouzového osvětlení

Pro zajištění dostatečné viditelnosti při evakuaci je nouzové osvětlení požadováno v celém prostoru. Značky, jež jsou na všech východech a podél únikových cest určeny k použití ve stavu nouze, musí být osvětleny tak, aby jednoznačně ukazovaly cestu úniku k bezpečnému místu.

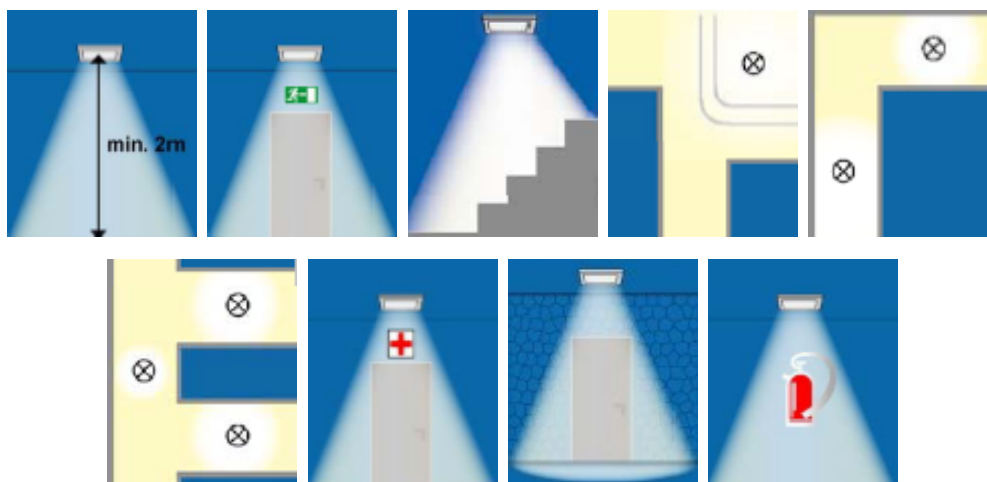
Nouzově osvětlené prostory se dělí:

- **úniková cesta**
- **protipanický prostor**
- **zvláště nebezpečné prostory**

Zvolená montážní výška nouzového svítidla v prostoru musí zajistit dostatečnou osvětlenost v blízkosti každých únikových dveří a v místech, kde je nezbytné zdůraznit možné nebezpečí nebo bezpečnostní zařízení. Místa, která musí být bezprostředně zdůrazněna:

- minimálně 2 m nad úroveň podlahy

- každé dveře určené pro nouzový východ
- v blízkosti schodiště vzdálenosti menší, než 2 m tak, aby každá řada schodů byla osvětlena přímým světlem
- v blízkosti menší, než 2 m pro každou změnu úrovně
- při každé změně směru
- při každém křížení chodeb
- vně a v blízkosti každého nouzového východu
- blízkosti menší, než 2 m pro každé místo první pomoci
- v blízkosti menší, než 2 m pro každý hasicí prostředek a požární hlásič

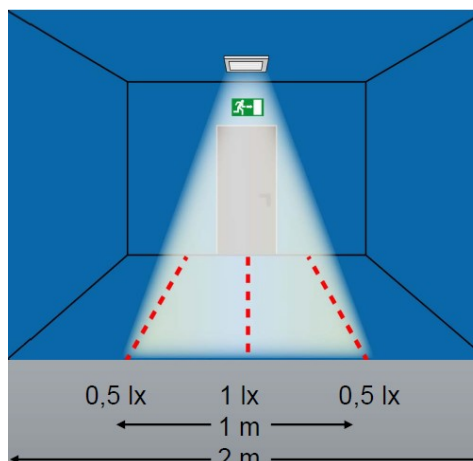


Obr. 2: Případy, v nichž je potřeba aplikovat nouzové osvětlení [22]

Místa první pomoci, hasicí zařízení nebo požární hlásiče, které jsou na únikové cestě nebo v prostoru s protipanickým osvětlením musí být osvětleny minimálně 5 lx. Maximální vzdálenost nouzových svítidel od těchto zařízení je minimálně 2 m. [4], [9], [22]

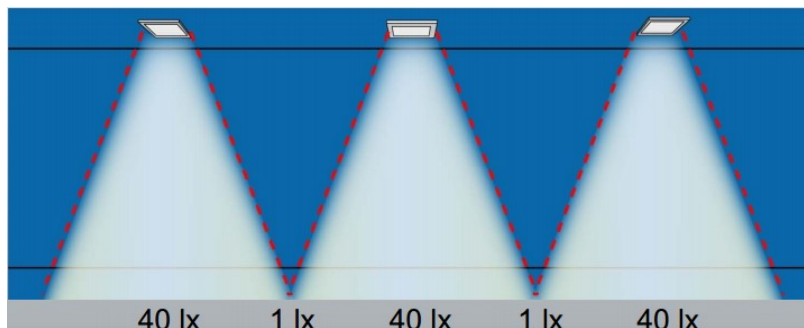
2.2.1. Úniková cesta

Každá úniková cesta široká maximálně 2 m musí splňovat podmínku horizontální osvětlenosti na podlaze podél osy únikové cesty, jejíž hodnota musí být minimálně 1 lx.



Obr. 3: Požadavky na hodnoty intenzity osvětlení únikových cest [22]

Středový pás únikové cesty, který je široký alespoň polovinu cesty, musí být osvětlen nejméně na 50 % této hodnoty. Únikové cesty, které jsou širší než 2 m, mohou být uvažovány jako několik 2 m širokých pásů nebo vybaveny protipanickým osvětlením (pro veřejné prostory). Požadovaná osvětlenost se měří na srovnávací rovině ve výšce 2 cm nad podlahou.



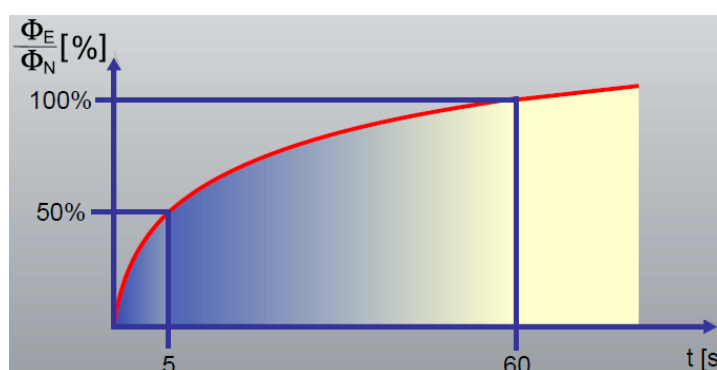
Obr. 4: Požadavky na rovnoměrnost osvětlení únikových cest [22]

Maximální a minimální osvětlenost podél osy únikové cesty musí být menší anebo nanejvýš rovno poměru 40:1.

Pro správné rozlišení bezpečnostních barev (značek, piktogramů) musí být minimální hodnota indexu podání barev R_A světelných zdrojů rovna 40, která platí pro veškeré nouzově osvětlené prostory. Svítidla nesmí tuto hodnotu podstatně omezovat. Minimální doba svícení nouzového únikového osvětlení přijatelná pro únikové účely je stanovena normou na 1 hodinu. Nouzové osvětlení únikových cest musí dosáhnout 50 % požadované osvětlenosti do 5 s a plné požadované osvětlenosti do 60 s. Splnění požadavků horizontální osvětlenosti, hodnoty indexu podání barev R_A a času dosáhnutí požadované osvětlenosti může být dle normy ČSN EN 1838 ověřeno měřením nebo porovnáním s ověřenými údaji od dodavatele. [2], [4], [9], [22]

2.2.2. Protipanický prostor

V prostorech s použitím protipanického osvětlení nesmí být vodorovná osvětlenost menší než 0,5 lx v úrovni podlahy uvnitř prázdného prostoru s výjimkou obvodového pruhu o šíři 0,5 m.



Obr. 5: Dosažitelnost požadované hladiny osvětlenosti pro únikové cesty a protipanické prostory [22]

Kde uvedené veličiny na grafu reprezentují:

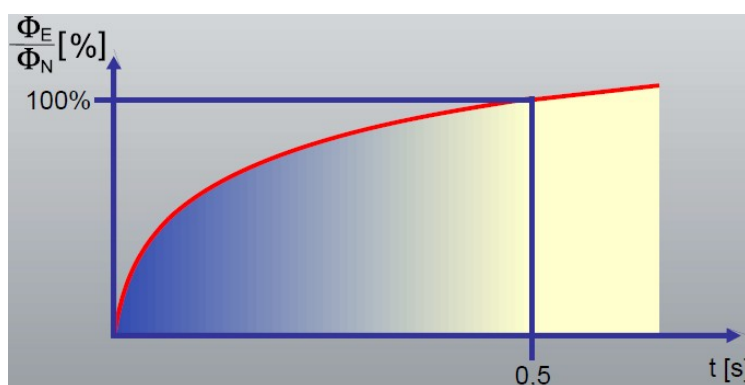
Φ_E aktuální hodnota světelného toku

Φ_N jmenovitá hodnota světelného toku

Maximální a minimální osvětlenost podél osy únikové cesty musí být menší anebo nanejvýš rovno poměru 40:1. Svítidla nesmí tuto hodnotu podstatně omezovat. Minimální dovolená doba pro únik je normou stanovena na 1 hodinu. Nouzové osvětlení únikových cest musí dosáhnout 50 % požadované osvětlenosti do 5 s a plně požadované osvětlenosti do 60 s. [2], [9], [10], [22]

2.2.3. Zvláště nebezpečný prostor

V prostorech s velkou mírou rizika musí být udržovaná osvětlenost na srovnávací rovině větší než 10 % požadované udržované osvětlenosti pro danou činnost, avšak nesmí být menší než 15 lx. Nouzové osvětlení nesmí vytvářet škodlivý stroboskopický jev. Rovnoměrnost osvětlení prostorů s velkým rizikem nesmí být menší než 0,1. Omezující oslnění musí být zredukováno omezením svítivosti nouzových svítidel v zorném poli. Svítidla nesmí tuto hodnotu podstatně omezovat. Minimální doba svícení nouzového osvětlení musí být rovna době trvání pro osoby v nebezpečí. Nouzové osvětlení prostorů s velkým rizikem musí poskytovat požadovanou osvětlenost trvale, nebo do 0,5 s v závislosti na jeho použití. [2], [4], [9], [10], [22]



Obr. 6: Dosažitelnost požadované hladiny osvětlenosti pro prostory s velkým rizikem [22]

2.2.4. Limity omezujícího oslnění

Mezi významný faktor, který se minimálně při vypracovávání projektu kontroluje, je vysoký kontrast mezi svítidlem a pozadím (omezující oslnění). Vysoký jas svítidla může oslnit a znemožnit viditelnost překážek nebo značek.

Montážní výška na úrovni podlahy h	Maximální svítivost svítidel osvětlení únikových cest a protipanického osvětlení I_{maxs}	Maximální svítivost svítidel nouzového osvětlení prostorů s vysokým rizikem I_{maxs}
[m]	[cd]	[cd]
$h < 2,5$	500	1000
$2,5 \leq h < 3,0$	900	1800
$3,0 \leq h < 3,5$	1600	3200
$3,5 \leq h < 4,0$	2500	5000
$4,0 \leq h < 4,5$	3500	7000
$h \geq 4,5$	5000	10000

Tab. 1: Limity omezujícího oslnění [9]

Pro vodorovné únikové cesty nemá svítivost nouzového svítidla překročit doporučené limity v oblasti úhlů od 60° do 90° od svislice pro všechny úhly azimutu. Pro ostatní případy nesmí být limitní hodnoty překročeny v žádném úhlu. [9], [10], [22]

2.3. Svítidla a světelné zdroje používané v nouzovém osvětlení

V minulosti byla adaptace svítidel nouzového osvětlení do stavebních návrhů nutným zlem každého architekta a interiérového designéra, protože trh explicitně disponoval designem bílé neforemné krabice se zeleným panáčkem. V dnešní době, kdy se kladou stále větší nároky na kvalitu a estetický vzhled prostředí, ve kterém se pohybujeme, je stále větší poptávka po moderně a funkčně účelných systémech nouzových svítidlech, které lze umístit nejen do reprezentativních prostorů, chodeb, foyer, ale i do běžných prostorů.



Obr. 7: Moderní nouzová svítidla určené pro různé nouzové prostory [37]

V současné době jsou pro estetické prostředí dvě varianty použití nouzových svítidel. První varianta nabízí dekorativní svítidla bez nouzového režimu, která jsou vybavena invertorem pro nouzovou funkci. Druhá varianta nabízí použití klasického nouzového svítidla s dekorativním designem. Nouzové svítidla se v přítomnosti stávají součástí elektrické instalace a mohou zastávat funkci přijatelného doplňku celého interiéru, eventuálně nemusí být pro požadavek koncového zákazníka zcela viditelné. [21]

2.3.1. Světelné zdroje používané v nouzovém osvětlení

Pro zajištění dostatečného světelného toku při zachování minimálních rozměrů, dlouhé životnosti zdroje s ohledem na vlastní spotřebu systému nouzového osvětlení, se v současné době používají světelné zdroje s nízkotlakými výbojkami (kompaktní nebo lineární zářivky), případně speciální výbojky (zářivky se studenou katodou). Oblast nouzových svítidel disponuje neustálým vývojem ve snižování energetické náročnosti světelných zdrojů, ve které jsou stále více zaměňovány konvenční zdroje za světelné zdroje s použitím LED diody mající vynikající kvalitativní a kvantitativní parametry. V systémech nouzového osvětlení patří mezi nejdůležitější vlastnost světelných zdrojů rychlý náběh světelného toku na maximální hodnotu. Tato vlastnost je nejlépe adaptována LED světelnými zdroji. [21]

2.3.1.1. Zářivky

Zářivky patří do skupiny výbojových zdrojů. Světlená energie je vyzařována pomocí průchodu elektrického proudu prostředím obsahujícím vodivé plyny nebo páry. Elementárně je tvořena zářivkovým tělesem, jehož základem je nejčastěji skleněná trubice se žhavicími elektrodami, naplněná rtuťovými parami a argonem. Průchodem elektrického proudu v trubici nastává doutnavý výboj zářící převážně v neviditelném ultrafialovém pásmu. Vygenerované záření dopadá na stěny trubice, které jsou pokryty luminoforem. Tato látka absorbuje a poté transformuje ultrafialové záření do viditelné oblasti. [1]

Nejpoužívanějšími druhy výbojových světelných zdrojů, používaných v oblasti nouzového osvětlení jsou:

- zářivky lineární
- zářivky kompaktní
- zářivky se studenou katodou

Výhody:

- vysoká účinnost přeměny elektrické energie na světelnou
- vhodné geometrické parametry
- velmi široký sortiment příkonů od 4 do přibližně 200 W
- u speciálních typů lze získat R_A až 98 při velmi dobrém měrném výkonu
- dlouhý život až 20 tisíc hodin při dobré stabilitě světelného toku v průběhu svícení [1]

Nevýhody:

- závislost světelného toku na teplotě okolního prostředí
- nutnost předřadných a startovacích obvodů, které částečně snižují měrný výkon nouzové osvětlovací soustavy
- vliv počtu zapnutí na život zářivky
- obsah těžkého kovu (rtuti), zářivky nelze po konci života odkládat do komunálního odpadu, ale je nutné je likvidovat u pověřených organizací
- relativně pomalý náběh světelného toku na maximální úroveň [1]

2.3.1.2. Lineární zářivky

Trubice je vytvořena z měkkého sodno-vápenatého skla. Vnitřní strana je pokryta jedním, u speciálních provedení dvěma vrstvami luminoforů. Na obou koncích je vtavena wolframová katoda, na které je nanášena emisní hmota na bázi barya a vápníku. V blízkosti elektrod je na neutrálním přívodu instalována ochranná clonka, která zabraňuje usazování vypařující se emisní hmoty na vrstvě luminoforu. Ochranná clonka znemožňuje černání konců zářivek a přispívá ke stabilitě světelného toku během svícení. [1], [13]



Obr. 8: Lineární zářivka používaná v nouzovém svítidle [38]

2.3.1.3. Kompaktní zářivky

Kompaktní zářivka je charakterizována konstrukcí s jednou paticí a malými rozměry, které jsou získány účelným složením výbojové dráhy. Výbojová trubice je vytvořena z měkkého olovnatého skla. Vnitřní strana je pokryta vrstvou ze směsi dvou nebo tří úzkopásmových luminoforů na bázi prvků vzácných zemin, které mají maximum záření v červené, zelené, popř. modré oblasti viditelného spektra. Skleněná trubice je na obou koncích opatřena wolframovými elektrodami pokrytými emisní hmotou a zatmelenou do plastové patice. [1], [13]



Obr. 9 Kompaktní zářivka používaná v nouzových svítidlech [39]

2.3.1.4. Zářivka se studenou katodou

Princip vyzařování světelné energie je obdobný jako u lineárních zářivek. Skleněná trubice je obvykle naplněna neonem, argonem, heliem a dusíkem. Hlavní předností této technologie je dlouhá životnost, minimální zahřívání a nízký příkon. Tento druh světelného zdroje je nejčastěji využit pro nasvětlení bezpečnostních a informačních značek (piktogramů). [1], [13]



Obr. 10: Zářivka se studenou katodou používaná v nouzových svítidlech [40]

2.3.1.5. LED diody

LED dioda je elektronická součástka obsahující P-N přechod. LED (*Light-Emitting Diode*) dioda se dříve využívala v elektrotechnice k indikaci provozních stavů. S potenciálem výkonného zdroje se začala prosazovat v posledních dvaceti letech. Luminiscenční dioda vyzařuje viditelné, ultrafialové a infračervené záření v úzkém spektru barev. Použití diodových světelných zdrojů je využito v široké škále aplikací.

Průchodem elektrického proudu P-N přechodem v propustném směru, přechod generuje (emituje) nekoherentní světlo s úzkým spektrem. Záření je v závislosti úzkého vyzařovaného spektra v podstatě monochromatické. LED může emitovat i jiné druhy záření. Světelná energie vyzařována z P-N přechodu je způsobena jevem, který se nazývá elektroluminiscence.

LED světelné zdroje jsou oproti konvenčním zdrojům (žárovka, výbojka, doutnavka) výhodné svými malými příkony (poměrně malé hodnoty proudu na napětí). [12]



Obr. 11: Výkonová LED dioda [41]

Výhody:

- měrný výkon mnohonásobně převyšuje poměr ostatních světelných zdrojů - nejmodernější až 150 lm / W a do budoucna se počítá až s 225 lm / W
- vyšší účinnost transformace elektrické energie na světelnou energii
- barva světla je vytvořena ihned v luminoforu bez použití složitých barevných filtrů
- při funkci stmívání nemění svou barvu při snížení napájecího proudu
- oproti žárovkám, které při snížení výkonu dodávají do prostoru světlo se žlutým nádechem
- vysoká odolnost proti nárazům
- rychlý náběh světelného toku na maximální úroveň
- při častých provozních změnách (zapínání a vypínání) nedochází k degradaci světelného zdroje
- extrémně dlouhá životnost, která je odhadovaná mezi 100 000 až 1000 000 hodin, uvedené hodnoty neplatí u výkonných LED
- konstrukční rozměry jsou velice malé, osazování desek plošných spojů
- neobsahují rtuť [12]

Nevýhody:

- vyšší pořizovací cena (počítána v ceně za lm), než v případě konvenčních světelných zdrojů
- světelný výkon je závislý na teplotě okolního prostředí
- světelná energie je vyzařována jen v úzkém paprsku v jednom směru
- bílé světlo může zkreslovat barvy [12]

2.3.2. Svítidla používaná v nouzovém osvětlení

Každé nouzové svítidlo musí v první řadě splňovat požadavky normy ČSN EN 60598-1 Svítidla, část 1. Všeobecné požadavky a zkoušky. Druhy nouzového osvětlení. U svítidel určených pro nouzovou funkci se předpokládá, že splňuje specifické požadavky na svítidla pro nouzové osvětlení dané normou 60598-2-22 Zvláštní požadavky – Svítidla pro nouzové osvětlení. [5], [11]

2.3.2.1. Nouzové svítidlo v pohotovostním režimu

V současné době je nejběžnějším typem nouzového svítidla, ve kterém jsou světelné zdroje v chodu pouze tehdy, pokud je napájení normálního osvětlení přerušeno. V běžné praxi jsou tyto svítidla označovány jako svítidla netrvalá, svítidla pro netrvalé (nouzové) osvětlení, nouzový provoz, nouzové svítidlo. [5], [11]

2.3.2.2. Nouzové svítidlo v trvalém provozu

V této variantě jsou světelné zdroje pro nouzové osvětlení zapnuté po celou dobu, kdy je potřebné normální nebo nouzové osvětlení. V rámci praxe je běžně využíván v kancelářských budovách, kde je řešeno nouzové osvětlení jako součást osvětlovací soustavy normálního osvětlení většinou souběžně s centrálním napájením nebo autonomním napájením pomocí invertoru (zařízení složené z elektronické jednotky a baterie). Svítidla charakteristická nepřetržitým typem provozu jsou označována jako svítidla trvalá, svítidla pro trvalé osvětlení anebo stále svítící. [5], [11]

2.3.2.3. Kombinované nouzové svítidlo

Svítidlo obsahuje dva nebo více světelných zdrojů, z nichž alespoň jeden je napájen ze zdroje pro nouzové osvětlení, a ostatní jsou napájené z normálního světelného obvodu. Kombinované nouzové svítidlo může být provozováno v nepřetržitém nebo v netrvalém režimu. Jedná se o kombinaci dvou na sobě nezávislých provozů v jednom svítidle. [5], [11]



Obr. 12: Klasické nouzové svítidlo [42]

2.3.3. Třídění a značení svítidel

Podle výše uvedených norem musí každé nouzové svítidlo splňovat obecné požadavky a informace:

- jmenovité napětí nebo rozsahy napětí
- zatížení svítidla
- detaily o výměně světelného zdroje v místě viditelném při vyjmutí světelného zdroje
- zřetelné označení zkušebních zařízení pro simulaci poruchy normálního napájení

Každé svítidlo nouzové osvětlovací soustavy je nutné třídit a označit podle jejich konstrukce. Na svítidle musí být umístěn štítek informující o typu svítidla, provozního režimu, vybavení svítidla a jmenovitá doba trvání nouzového režimu. Informativní štítek se skládá z obdélníku rozděleného na tři nebo čtyři části obsahující jednu nebo více položek.

	Typ		Provozní režim		Vybavení		Doba *)
X	samostatné	0	NS v dočasném zapojení	A	včetně zkušebního zařízení	*10	10 min
Z	centrálně napájené	1	NS v trvalém zapojení	B	včetně dálkového klidového režimu	*60	1 h
		2	kombinované NS v dočasném zapojení	C	včetně vypínacího režimu	120	2 h
		3	kombinované NS v trvalém zapojení	D	svítidlo pro riziková pracoviště	180	3 h
		4	sdíružené NS v dočasném zapojení				
		5	sdíružené NS v trvalém zapojení				
		6	přidružené NS				

Tab. 2 Ukázka finančního porovnání centrálního a decentralizovaného řešení devítipatrového objektu [5]

První sloupec obsahuje informaci o způsobu napájení. Druhý sloupec informuje o provozním stavu. Může nabýt až sedmi možností. Třetí sloupec „vybavení“ se doplní při instalaci svítidla. Čtvrtý sloupec obsahuje informaci o minimální době trvání (v minutách) nouzového režimu u samostatných svítidel. [5], [11]

2.3.4. Parametry svítidel

Nejdůležitější parametry z hlediska světelné techniky u nouzových svítidel musí výrobce svítidel uvádět v literatuře přiložené ke svítidlu:

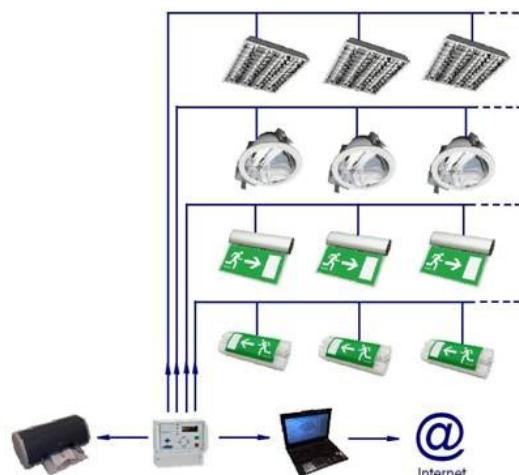
- jmenovitý světelný výkon (Φ , lm) – 5 vteřin po výpadku normálního napájení musí svítidlo distribuovat 50 % jmenovitého světelného výkonu a plný jmenovitý výkon po 60 vteřinách plynule až do konce nouzového provozu. Riziková pracoviště jsou podmíněna distribucí světelné energie do 0,5 s po přerušení normálního napájení.
- jmenovitý příkon zdroje
- typ provozu
- fotometrické údaje – křivka svítivosti, tabulka hodnot svítivosti (I, cd) [5], [11]

2.3.5. Adresovatelná nouzová svítidla

Nejpohodlnějším způsobem ovládání nouzových osvětlovacích soustav se stává řešení pomocí adresovatelných nouzových svítidel, která jsou ovládána centrální ovládací jednotkou. Každé svítidlo je spojeno s centrálou prostřednictvím sběrnice. [5], [11]

2.3.6. Monitorovací systém

V rozsáhlých budovách, kde je potřeba nainstalovat velké množství svítidel je zapotřebí kontroly jednotlivých okruhů i samotných svítidel. Každé svítidlo má jedinečnou adresu a pomocí ní posílá údaje o aktuálním stavu a případných poruchách. Výsledky testů jsou stahovány a vizualizovány v PC rozhraní. Tento způsob je funkční při použití kteréhokoli ze zmíněných řešení. [8], [44]



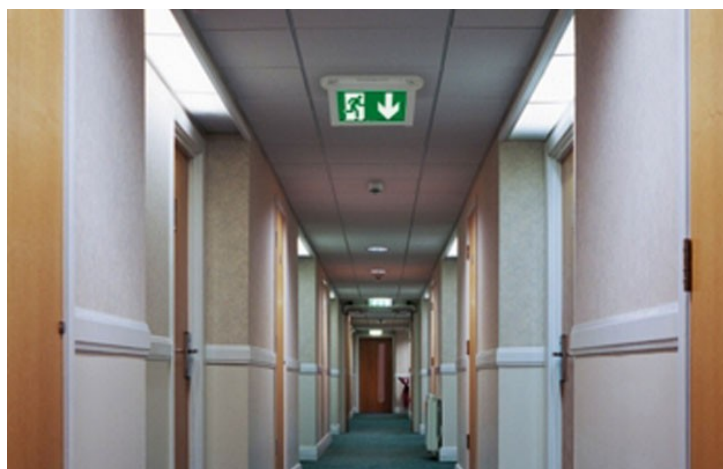
Obr. 13: Ukázka monitorovacího systému [44]

2.4. Současně používané systémy napájení nouzového osvětlení

V českých veřejných budovách je umělá osvětlovací soustava majoritně složena z normálního osvětlení, které plní osvětlovací funkci při běžných provozních podmínkách. V případě jakéhokoliv selhání, přerušení normálního osvětlení nebo např. požáru se samočinně vybaví nouzové osvětlení napájené z nezávislého zdroje (centrálního, autonomního), kterým není napájeno normální osvětlení. Normální osvětlení je z většiny případů napájeno ze střídavé rozvodné sítě. Pro oba způsoby napájení vyžadují napojení všech nouzových svítidel na centrální monitorovací systém, který umožňuje z jednoho místa řídit a současně provádět a vyhodnocovat periodické testy funkčnosti a autonomie a indikovat možné poruchy na svítidlech.

V provozním stavu je možné napájet svítidla nouzového osvětlení dvěma způsoby:

- nouzová svítidla, která jsou napájena autonomními zdroji elektrické energie umístěnými v jednotlivých svítidlech
- nouzová svítidla, která jsou napájena z centrálního zdroje elektrické energie



Obr. 14: Systém nouzového osvětlení [22]

Celkové investiční náklady se odvíjí podle zvoleného způsobu napájení nouzového osvětlení. Každý napájecí systém má klady a zápory. Při realizaci projektu je zapotřebí řešit faktory s ohledem na:

- typ objektu
- velikost objektu
- probíhající funkce a procesy v objektu
- pohyb osob po budově
- předpokládaný počet nouzových svítidel [8], [11], [22]

2.4.1. Nouzový systém s centrální akumulátorovou baterií

Tento případ zapojení nouzového systému napájí svítidla z centrálního zdroje. Jeho funkčnost a provozní stabilita musí být zajištěna i při požáru, proto je nutné kabely a kabelové trasy řešit pomocí nehořlavé technologie. Centrální zdroj je ve všech případech umístěn v rozvodně spolu s centrálním rozvaděčem. Splněním funkce nouzového osvětlení pomocí tohoto způsobu zajišťuje jednodušší splnění provozních podmínek.



Obr. 15: Centrální záložní akumulátorový systém [43]

V praxi je nejběžnějším centrálním zdrojem pro napájení nouzových svítidel olověný akumulátorový článek, který je vyznačován poměrně malým počátečním finančním nákladem a vysokým měrným výkonem a téměř žádnou provozní údržbou.

Výhody:

- snadná údržba centrálního zdroje, výměna jedné akumulátorové baterie se provádí přibližně jednou za deset let
- vyšší světlený výkon nouzového svítidla

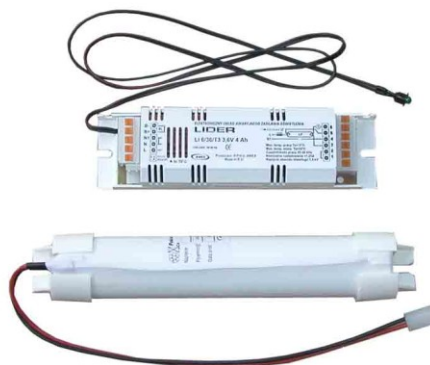
Nevýhody:

- při přerušení obvodu napájecího vedení je okruh nouzových svítidel nefunkční
- nutnost použití požárně-odolných kabelů
- nutnost použití požárně odolných tras
- nutnost použití požárně-odolných patrových rozvaděčů
- vyšší pořizovací náklady
- nutnost vypnutí při povodních [8], [15]

2.4.2. Nouzový systém s autonomní akumulátorovou baterií

Autonomní akumulční zdroje samostatných nouzových svítidel jsou trvale nabíjeny z rozvodné sítě a v případě ztráty normálního napájení je svítidlo napájeno ze svého zdroje. Tento způsob umožňuje zapojení svítidla standardními kabely.

Akumulátorové baterie musí splňovat požadavky v příslušné normě ČSN EN 50272-2 odkazující minimální čtyřletou dobu normálního provozu, které je možno používat jen při osvětlování nouzového stavu. Každá baterie umístěná ve svítidle musí být označena rokem a měsícem, nebo rokem a týdnem výroby a údajem o správném způsobu její likvidace. Dále musí být opatřena štítkem s označením data uvedení do provozu.



Obr. 16: Klasická zálohovací baterie s předradníkem a testovacím tlačítkem – invertor [45]

Nabídka výrobců samostatných nouzových svítidel v dnešní době poskytuje převážně nikl-kadmiové baterie, jejichž dopad na životní prostředí není ideální. V nestandardních případech je možné použít i jiný typ akumulátorového článku, který je mnohem šetrnější k životnímu prostředí, protože neobsahuje těžké kovy. V současné době stále více převažuje zisk pro konečného uživatele v podobě nižší ceny než otázka ekologického smýšlení.

Výhody:

- svítidlo reaguje na pokyn z centrálního monitorovacího systému
- nebere ohled na stav napájecího vedení
- jednodušší instalace
- maximální variabilita
- připojení svítidla z patrového rozvaděče klasickými kabely
- nižší pořizovací náklady

Nevýhody:

- méně častá údržba – přibližně jednou za pět let výměna akumulátorů v každém svítidle (podle informace získané z monitorovacího systému)
- nižší světelný výkon svítidel
- nutnost většího počtu svítidel

S ohledem na stanovisko bezpečnosti osob a majetku, celistvé jednoduchosti je patrná převaha kladných rysů u decentralizovaného systému. [8], [10], [15]

	Centrální zdroj	Autonomní akumulátor	
Položka	700	800	[ks]
Počet nouzových svítidel nebo svítidel s inventory	10 mil.	4 mil.	[Kč]
Celkové investiční náklady systému včetně kabeláže	2 mil.	3 mil.	[Kč]
Provozní a servisní náklady během deseti let	12 mil.	7 mil.	[Kč]

Tab. 3: Finanční srovnání centrálního a autonomního systému [8]

2.4.3. Konvenční akumulátory a zdroje používané v systémech nouzového osvětlení

2.4.3.1. Olověný akumulátor

Olověné akumulátorové baterie jsou v současné době nejpoužívanějším centrálním zdrojem pro napájení nouzového osvětlení při provozním chodu. Olověný akumulátorový článek ukládá elektrickou energii pomocí chemických reakcí. V případě odebrání většího proudu, než jmenovitého dochází u galvanického olověného článku k rapidnímu zkrácení životnosti. Olověné baterie byly nejpoužívanějším sekundárním elektrochemickým zdrojem elektrické energie. Největší technická výhoda olověných akumulátorů je dobře zvládnutá technologie výroby, relativně nízká cena a poměrně vysoký výkon. [15], [18]



Obr. 17: Olověná baterie používaná v aplikaci centrálního napájení [46]

2.4.3.2. Vysokoteplotní NiCd akumulátor

Nikl-kadmiový akumulátor je momentálně nejběžnějším zdrojem elektrické energie v systémech autonomního napájení nouzového osvětlení při provozním chodu. Technologie výroby je uzpůsobena dvěma variantám. První se vyrábí se zaplavenými elektrodami a kapalným elektrolytem (velké staniční baterie). Druhá varianta výroby je hermeticky uzavřená (akumulátory do řemeslných přístrojů, akumulátorové vrtačky, decentralizované systémy nouzového osvětlení). Maximální provozní teplota NiCd článků je určena výrobcem na 55°C, při které její parametry vydrží v provozním režimu 4 roky.

NiCd je opatřena vysokou odolností proti hlubokému vybití. Největší technická nevýhoda NiCd systému je nižší měrná kapacita oproti superkapacitorům, NiMH a Li-ion akumulátorů. [15], [19]



Obr. 18: Nikl-kadmový článek používaný v autonomním napájecím systému [47]

2.4.3.3. Nikl-metal hydridový akumulátor

NiMH je druh galvanického článku. V případě potřeby se záložní zdroje nouzového osvětlení osazují NiMH akumulátory, které jsou šetrnější k životnímu prostředí. Základní přednost před nikl-kadmiovým akumulátorem je přibližně dvojnásobná kapacita, menší rozměry a hmotnost. NiMH akumulátory dodávají do systému poměrně vysoké proudy. Mají dlouhou životnost, ale pořizovací náklady jsou mnohem vyšší, než u NiCD článků. [15], [20]



Obr. 19: Nikl-metal hydridová baterie určená pro autonomní systém [48]

2.4.4. Porovnání základních výkonově-technických parametrů zdrojů elektrické energie

V tabulce tab.1 jsou srovnány konvenční a experimentální zdroje elektrické energie používající se ve všech aplikacích s nutností záložního zdroje. Pro porovnání zdrojů s nechemickým způsobem ukládání energie byl k superkapacitoru přiřazen sloupec parametrů klasického elektrolytického kondenzátoru. NiCd a NiMH a Pb baterie jsou v současnosti nejpoužívanější skupinou záložních zdrojů v oblasti pokrytí dodávky energie do svítidel nouzového osvětlení jednotlivých kategorií.

	NiCd baterie	NiMH baterie	Pb baterie	Kondenzátor	Superkapacitor
nabíjecí doba [h,s]	1 – 5 h	1 – 5 h	1 – 5 h	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	0,3 – 30 s
vybíjecí doba [h,s]	1 -2	2 - 4	0,3 – 3 h	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	0,3 – 30 s
měrná energie [Wh/kg]	40 - 60	60 - 80	30 - 40	< 0,1	1 – 10
měrný výkon [W/kg]	<1500	<3000	< 1000	< 100 000	< 10 000
Životnost [cyklů]	500 - 1000	1000 - 1500	1000	> 500 000	> 1 000 000
účinnost [%]	> 80	>80	70 – 85	>95	85 – 98

Tab. 4 Výkonově-technické srovnání zdrojů elektrické energie [17]

Výkonově-technické parametry superkapacitoru jsou výhodné pro použití v celém spektru aplikací. Vysoká účinnost nabíjecího a vybíjecího procesu spolu s vysokou životností (počtem cyklů) určuje superkapacitory nejefektivnějším zdrojem energie nové generace.

Měrný výkon superkapacitoru je 5 až 10 krát vyšší oproti konvenčním zdrojům v nouzových svítidlech a vyznačuje se podstatně kratší nabíjecí, ale i vybíjecí dobou. V případě napájení nouzového svítidla doba vybíjení závisí na celkové účinnosti přenosu elektrické energie ze záložního zdroje do zdroje světelného. Uváděné rozmezí hodnot měrné energie je výrazně vyšší, než rozmezí klasického elektrolytického kondenzátoru.

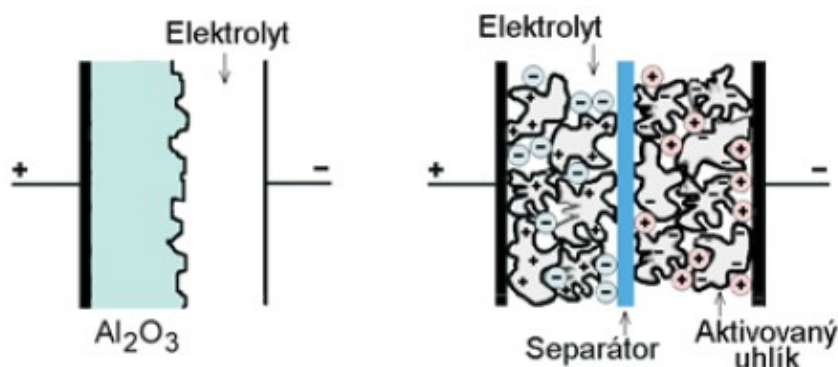
Výkonově-technické parametry řadí svým působením superkapacitory mezi oblast konvenčních zdrojů nouzových osvětlení a klasických elektrolytických kondenzátorů.

Současná úroveň elektronické technologie elektricky spojující superkapacitor a světelný zdroj (v našem případě vysoce-svítivá LED dioda) ve svítidle nouzového osvětlení umožňuje použití v aplikacích zajišťujících únikové a protipanické osvětlení s dobou svícení jedné hodiny (čas svícení je přebrán z normy), míst s požárními hlásiči, hasícími prostředky a s první pomocí. [17], [24], [27]

3. Napájení prototypu nouzových svítidel superkapacitorem

V souvislosti s rozvojem nanotechnologií došlo v posledních letech ke vzniku nových možností akumulace elektrické energie, která je uchována pomocí elektrického náboje na elektrodách. Tento způsob akumulace elektrické energie je zprostředkován akumulacími kondenzátory, neboli superkapacitory (z anglického SuperCap). Elektrické vlastnosti kondenzátoru jsou již známy na světě dlouhou dobu, ale až v posledních letech se zdokonalily povrchy materiálu (elektrod, dielektrika, separátoru, elektrolytu), že se dají pro akumulaci energie na delší dobu efektivně využít.

Nejvíce se v současnosti uplatňují při zálohování dat v elektronických obvodech a podobných aplikacích s nízkou spotřebou. Nově nacházejí využití také při startování pohonů vysokými proudy, ve stejnosměrných meziobvodech měničů při redukci odběrových špiček a v dopravní technice při akumulaci brzděné energie vozidel, která se využije při jejich dalším rozjezdu.



Obr. 20: Akumulační struktura klasického elektrolytického kondenzátoru a superkapacitoru [25]

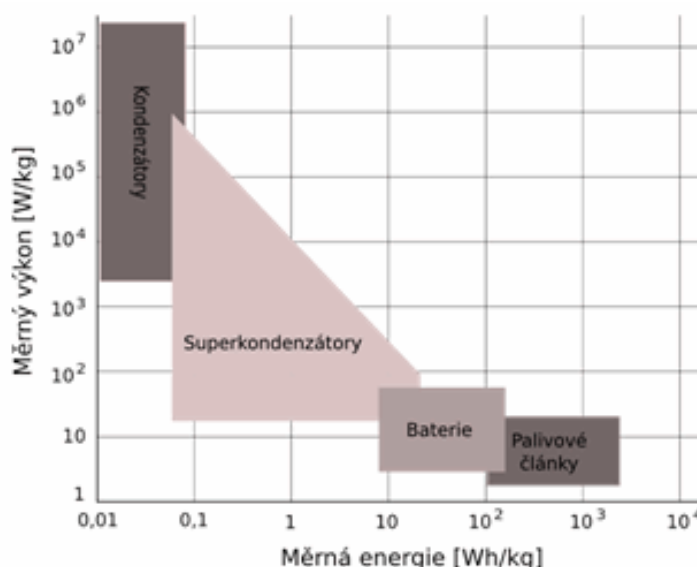
Supercapacitor (označován jinak superkondenzátor, ultrakondenzátor, ultrakapacitor, elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor) na rozdíl od nejrůznějších chemických akumulátorových zdrojů (NiCd, Pb, NiMh, Ni-Fe, Li-Pol, Li-ion) nevyužívá k přeměně elektrické energie elektrochemický princip. Z tohoto důvodu dosahuje velmi vysoké životnosti a vysokého počtu provozních cyklů. Supercapacitor uchovává elektrickou energii prostřednictvím energie elektrostatické mezi dvěma elektrodami a elektrolytem. Tato elektrotechnická součástka je vyrobena za účelem schopnosti pojmout značnou kapacitu v řádu stovek až tisíců Faradů. Výhodné vlastnosti klasických elektrolytických kondenzátorů jsou zachovány, převážně reverzibilním mechanismem rychlého nabíjení a vybíjení v řádu 1000000 cyklů. Četné opakování nabíjecích a vybíjecích cyklů velkými proudy, superkapacitory netrpí negativními vlastnostmi jako je zahřívání nebo snižování života součástky. Použitá technologie umožňuje pracovat za nízkých provozních teplot a nedochází u něj k paměťovému efektu. Kapacita superkapacitoru je přímo úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti.

Ve spojení s LED světelnými zdroji se supercapacitor nabízí jako ideální zdroj pro zálohování elektrické energie pro napájení nouzového osvětlení. [23], [24], [25], [26]

3.1. Popis struktury a vlastností superkapacitoru

Superkapacitor je složen ze dvou nereaktivních pórovitých desek (elektrod) ponořených do elektrolytu (vodivého roztoku) s napětím na deskách v nabitém stavu. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivém roztoku nebo gelovém elektrolytu, kterým je vyplněný prostor mezi elektrodami. Elektrostatická energie je uložena prostřednictvím polarizace elektrolytického roztoku. V případě nabíjení superkapacitoru se k elektrodám připojí stejnosměrné napětí, kdy kladný potenciál desky (anoda) přitahuje záporné ionty obsažené v elektrolytu, zatímco napětí na záporné elektrodě (katoda) přitahuje kladné ionty.

Velikost stejnosměrného napětí je dána hodnotou disociačního napětí použitého elektrolytu, po překročení disociačního napětí dochází k chemickým reakcím, které vytvářejí vzduch (degradace elektrolytu). Nabíjení superkapacitoru větším, než jmenovitým, maximálním napětím reaguje povrchová schránka zvětšováním povrchu a za okolností v závislosti na velikosti napětí může dojít k deformaci nebo explozi.



Obr. 21: Energetická bilance kondenzátoru, superkapacitoru, baterií a palivových článků [27]

Desky tímto mechanismem účinně vytváří dvě vrstvy se zrcadlovým rozložením elektrického náboje na kladném a záporném potenciálu (anodě a katodě). Průrazné napětí elektrické dvojí vrstvy závisí na vlastnostech separátoru, hodnota je velice nízká, proto jmenovité provozní i maximální napětí na superkapacitoru obvykle nepřesahuje hodnoty nepřesahující 3 V. Kladná a záporná elektroda je oddělena separátorem.

Aktivní elektrody jsou obvykle tvořeny na bázi hliníkové fólie (vysoce elektricky vodivé, přírodní elektrody se vyznačují velmi nízkou rezistencí), která je na vnitřní straně opatřena aktivním uhlíkem. Nízká rezistence zaručuje vysokou rychlost nabíjecího a vybíjecího cyklu a nízké ohmické ztráty při provozním stavu. Značná kapacita je dosažena navíjením velkých ploch elektrod spirálovitého profilu. Největší výhodou použití aktivní elektrod ve formě práškového uhlíku je:

- velká dosažitelná plocha skutečného povrchu (vysoká poréznost)
- elektrická vodivost
- chemická netečnost

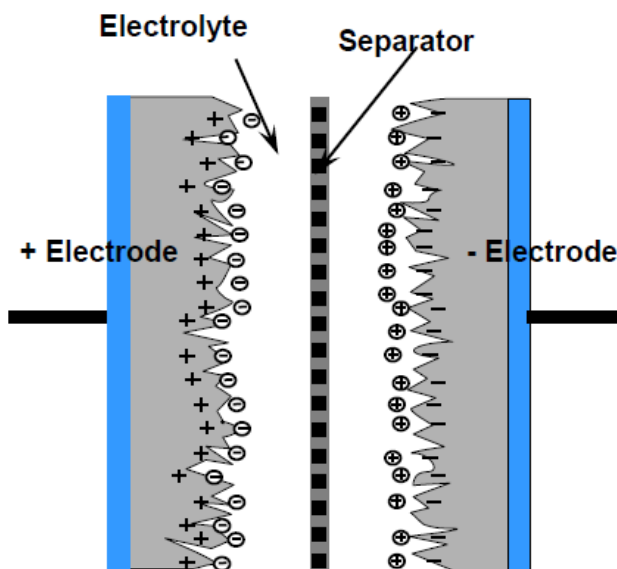
- vysoká teplotní stabilita
- vysoká odolnost proti korozi
- relativně nízká cena

První dvě výhody souvisí se správným navržením konstrukce elektrod pro maximální využití naakumulované energie. Prakticky lze povrch elektrod vytvořený z jednoho gramu aktivního (práškového) uhlíku získat až $2000 \text{ m}^2/\text{g}$, což při extrémně malé tloušťce dvouvrstvy (do 10 nm) znamená kapacitu řádově tisíců Farad na velmi malém prostoru. [17], [23], [24], [26]

3.1.1. Látky obsažené v superkapacitoru

Struktura superkapacitoru je primárně složena z následujících částí: kladná a záporná elektroda, dvě vrstvy aktivního uhlíku, separační fólie a vodivý nebo gelový elektrolyt:

- **elektrody** - hliníková fólie a aktivní (práškový uhlík)
- **separátor** - polypropylenová nebo celulózová fólie a skleněné vlákno
- **elektrolyt** - kvartérní sůl (tetraethylamonium tetrafluoroborat) a organické rozpouštědlo (acetonitril)
- **ostatní** - hliník a ocel



Obr. 22: Superkapacitor v nabitém stavu [26]

Vrstvy aktivního uhlíku mohou být tvořeny z následujících materiálů:

- **uhlíkový aerogel** (Carbon aerogel) - aerogel je unikátní pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý z normálního gelu náhradou kapalné složky vzduchem. Uhlíkový aerogel poskytuje extrémně velkou povrchovou plochu okolo $400\text{-}1000 \text{ m}^2/\text{g}$. Malé superkapacitory s aerogelem jsou vhodné pro aplikace spojené se zálohovacími bateriemi v nízkopříkonové mikroelektronice
- **uhlíkové polymery** - polymery vyznačující se redukčním-oxidačním paměťovým mechanismem (reduction-oxidation storage mechanism) společně s velkou povrchovou oblastí

- **uhlíkové nanotrubice** - jsou hlavní budoucností superkapacitorů. Uhlíkové nanotrubice mají výbornou pórovitost s póry o velikosti několika nm. Navíc poskytují miniaturní prostory uvnitř trubice, které fungují jako dielektrikum

Elektrolyt je v případě superkapacitorů vyráběných firmou Maxwell tvořený acetonitrilem CH_3CN (nitril kyseliny octové, metylkyanid). Tato organická sloučenina je bezbarvá kapalina, která je nejjednodušším organickým nitrilem. Proto nesmí být superkapacitor rozebírán, mechanicky poškozován, vhazován do otevřeného ohně a vystavován větším teplotám než 85°C . V případě nedodržení některého pravidla bezpečné manipulace by mohlo dojít k úniku škodlivých látek do okolního prostředí. V případě, že dojde ke kontaktu s látkami ze superkapacitoru, je nutné včas omýt dostatečným množstvím vody na postižené místo a vyhledat lékařskou pomoc. Vznícené superkapacity by neměly být hašeny vodou, ale práškovými nebo sněhovými přístroji. Hašení vodou je neúčinné, většinou slouží pro ochlazení částí superkapacitoru nebo k ochraně osob. Při transportu nevyžadují žádné speciální zacházení. Při jejich likvidaci je však nutné dodržovat postupy, které zabrání úniku acetonitrilu. [17], [23], [24], [25], [26]

3.1.2. Konstrukce superkapacitoru

Konstrukční specifika každého superkapacitoru jsou závislá na druhu praktického využití. Obecně se mohou použité materiály každého výrobce nepatrně lišit, ovšem základní charakter použitých částí je shodný (skládají se z kladné a záporné elektrody, separátoru mezi elektrodami a elektrolytu). [26]

3.1.3. Typické aplikace s použitím superkapacitoru

Superkapacity jsou v dnešní době nabízeny prakticky ve všech výkonových škálách. Charakter využití je uplatněn v řadě průmyslových odvětví poskytující potřebný výkon. Ucelené systémy v praxi mohou být napájeny výkonem řádů mW až několik stovek kW podle aktuální potřeby. Superkapacity jsou pro vynikající parametry dodávky a akumulace energie používány například:

- **automobilový průmysl** - posilovač řízení, elektrické otevírání dveří, hybridní elektrický pohon
- **doprava** - tramvajové napájení, rekuperační brzdění, startér dieslového pohonu
- **průmysl** - přerušování napájení (UPS), bezpečnostní dveře, vysokozdvizné vozíky
- **spotřební průmysl** - digitální fotoaparát, notebook, PC, PDA, GPS, solární osvětlení [26]

3.1.4. Životnost superkapacitoru

Doba života superkapacitoru je dána především kombinací napájecího napětí a pracovní teploty. Velikost kapacity nedegraduje při skladování ve vybitém stavu. Konec životnosti kondenzátoru je definovaný normami snížením vnitřní kapacity o 20% nebo nárůstu ekvivalentního stejnosměrného sériového odporu o 200%.

Superkapacitor fyzicky nezažije úplný konec životnosti. Maximální možná akumulace energie je po celou dobu používání superkapacitoru snižována vlivem teploty pracovního okolí a velikostí nabíjecího napětí. Konec života nastane, když superkapacitor již nedodá do systému požadované množství energie. Degradující křivka je vyjádřena exponenciálním průběhem. Nestrmější pokles

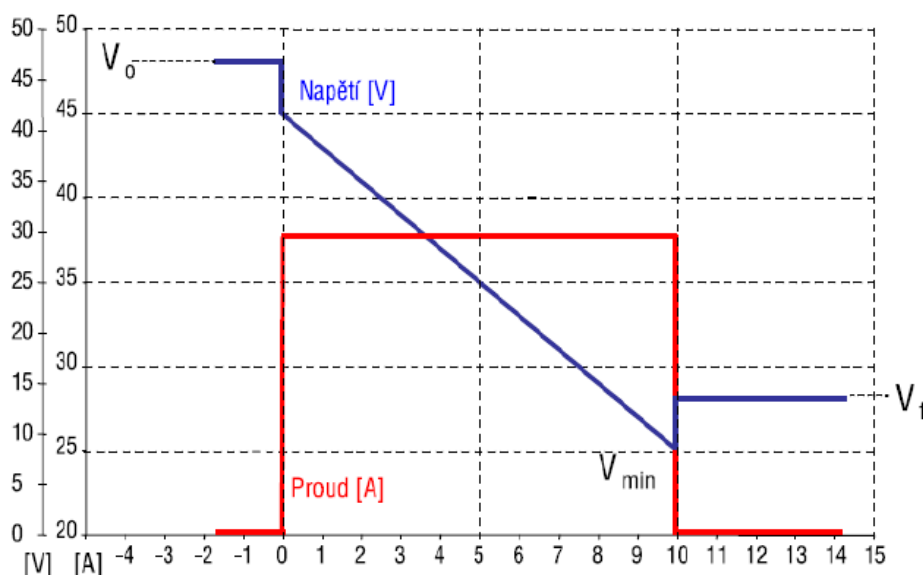
vnitřní kapacity dochází při prvotních provozních hodinách, poté je průběh pozvolnější. Největší vliv na degradaci kapacity má vnitřní ekvivalentní odpor. [23], [24], [25], [26]

3.2. Zjištěné výhody použití superkapacitoru v záložních systémech

Na základě studie a výpočtů bylo zjištěno, že superkapacitor je svými parametry adekvátním nástupcem konvenčních baterií. Oproti konvenčním akumulátorovým článkům má řadu předností využitelných v odvětví napájení nouzového osvětlení, popsanych ve výše uvedených kapitolách.

Velikost potřebné kapacity pro napájení nouzového svítidla vychází z vybíjecí charakteristiky superkapacitoru. Vybíjecí průběh je dán napěťovou a proudovou křivkou. Hodnota vnitřní kapacity je negativně ovlivňována vnitřním ekvivalentním odporem.

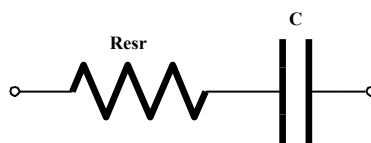
Světelný zdroj bude napájen konstantním proudem o velikosti 350mA. Napětí na kondenzátoru bude snižováno přibližně lineárně v závislosti na aktuální velikosti odebíraného proudu.



Obr. 23: Vybíjecí charakteristika superkapacitoru [16]

Charakteristické veličiny při procesu vybíjení superkapacitoru:

- U_0 – počáteční napětí nabitého superkapacitoru
- U_{ESR} – úbytek napětí na vnitřním ekvivalentním odporu
- U_{MIN} – minimální využitelné napětí na superkapacitoru s připojenou zátěží
- U_F – napětí na superkapacitoru 5 sekund po odpojení zátěže
- t_D – doba vybíjení superkapacitoru z napětí U_0 na napětí U_F
- I_C – konstantní vybíjecí proud



Obr. 24: Zobrazení parametrů skutečného superkapacitoru

Průběh vybíjecí charakteristiky lze odvodit z náhradního schématu skutečného superkapacitoru. Reálný superkapacitor je charakterizovaný dvěma parametry (vnitřní kapacitou a ESR). ESR při procesu vybíjení vyvolává úbytek napětí U_{ESR} , jehož vzorec je dle [35]:

$$U_{ESR} = \frac{U_F - U_{MIN}}{I_C} = R_{ESR} \cdot I_C \quad [\text{V}] \quad (3.2.1)$$

Úbytek napětí U_{ESR} snižuje maximální možné využitelné množství energie odebírané ze superkapacitoru dle literatury [35]:

$$\Delta W_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot [U_0^2 - (U_{MIN} + U_{ESR})^2] \quad [\text{J}] \quad (3.2.2)$$

Velikost celkového odporu superkapacitoru závisí na volbě použitého typu, počtu druhu zapojení [35]:

$$R_{CEL} = R_{KUS} \cdot \frac{R_{KUSS}}{R_{KUSP}} \quad [\Omega] \quad (3.2.3)$$

Maximální úbytek napětí U_{ESRMAX} vznikne působením nejvyššího odebíraného proudu ze superkapacitoru, který protéká uzavřeným obvodem samostatného nouzového svítidla při minimálním využitelném napětí na superkapacitoru (U_{MIN}). Ve výpočtu je zohledněná účinnost měniče a přenosu elektrické energie.

Obecně je mnohem větší ekvivalentní sériový odpor u článků s menší kapacitou, jehož vzorec je dle [35]:

$$U_{ESRMAX} = R_{CEL} \cdot I_{MAX} \quad [\text{V}] \quad (3.2.4)$$

$$U_{ESRMAX} = R_{KUS} \cdot \frac{P_{MAX}}{U_{MIN}} \cdot \frac{1}{\eta_{SYS}} \quad [\text{V}] \quad (3.2.5)$$

$$U_{ESRMAX} = 0,29 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{1}{0,7} = 4,603 \cdot 10^{-4} \quad [\text{V}]$$

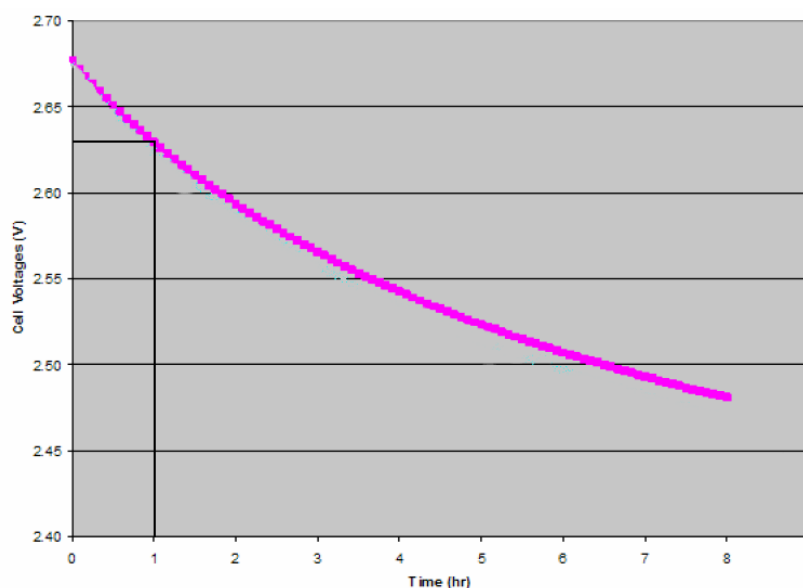
V aplikaci prototypu samostatného nouzového osvětlení napájeným superkapacitorem bude ekvivalentní sériový odpor zanedbatelně malý, protože z něj bude odebírán minimální pracovní proud. V závislosti na tomto důsledku bude i menší úbytek napětí. [16], [35]

3.3.Degradační vliv parametrů na superkapacitor

Samovybíjení je jev projevující se ztrátovým vybíjením zdroje elektrické energie, i když není na svorkách zdroje přivedena žádná zátěž. Proces samovybíjení snižuje a negativně ovlivňuje životnost superkapacitoru, ale projevuje se také u všech dalších konvenčních akumulátorových článků. Závisí na typu použitého materiálu elektrolytu, stavu aktuálního nabití, hodnoty nabíjecího proudu, okolní teplotě a dalších fyzikálně-chemických faktorech. Skladováním a provozováním superkapacitorů v nižších teplotách jsou snižovány ztráty způsobené samovybíjením.

Klasické elektrolytické kondenzátory jsou vybíjeny tímto ztrátovým jevem velice rychle. Snahou výrobců superkapacitorů je maximalizovat omezení týkající se ztrátového jevu. V současné době používaný technologický postup výroby ovšem proces samovybíjení nevyřešil a hodnoty jsou výrazné oproti konvenčním zdrojům používaných ve svítidlech nouzového osvětlení (NiCd – 15 - 20 % za měsíc, NiMH – 2 - 3% za měsíc).

Za hodinu podle níže uvedeného grafu a výpočtu ztratí superkapacitor samovybíjením přibližně 3% své akumulované energie. Nejrapidnější ztráty vznikají ihned po vypnutí napájecího vedení. [19], [20], [23], [24], [26]



Obr. 25: Samovybíjecí charakteristika superkapacitoru použitého v aplikaci prototypu [35]

Na charakteristice je vyznačen čas 1 hodiny, výpočet poklesu napětí po jedné hodině [35]:

$$\Delta U_{1H} = \frac{V_0 - V_{1H}}{V_0} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (3.3.1)$$

$$\Delta U_{1H} = \frac{2,67 - 2,63}{2,67} \cdot 100 = 1,5 \quad [\%]$$

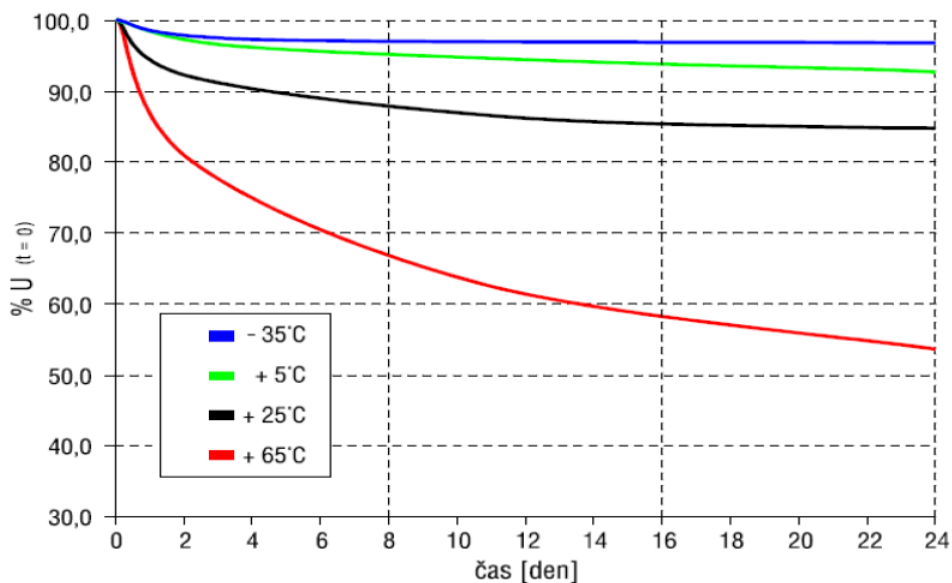
Výpočet úbytku naakumulované energie po jedné hodině naprázdno [35]:

$$\Delta W_{1H} = \frac{W_0 - W_{1H}}{W_0} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (3.3.2)$$

$$\Delta W_{1H} = \frac{2,67^2 - 2,63^2}{2,67^2} \cdot 100 = 3 \text{ [%]}$$

3.3.1. Teplotní závislosti samovybíjení superkapacitoru

Ztrátový jev samovybíjení je závislý převážně na teplotě (čím je obecně nižší provozní nebo skladovací teplota, tím pozvolnější je křivka závislosti úbytku napětí na teplotě). Matematický průběh závislosti poklesu napětí na čase je přibližně exponenciální s nejrazantnějším poklesem v prvních fázích procesu samovybíjení.



Obr. 26: Závislost úbytku naakumulovaného náboje na provozní teplotě [16]

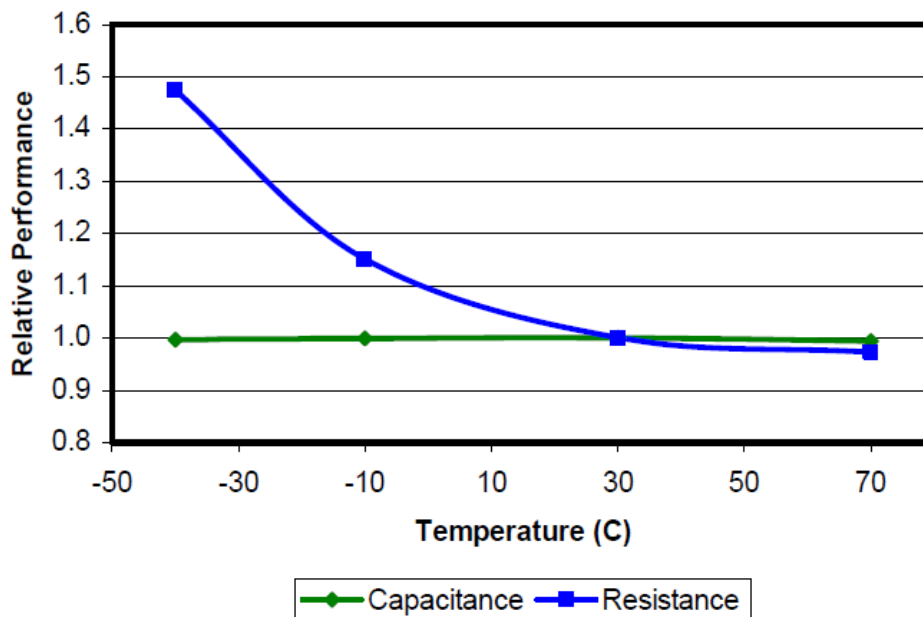
Použitím aplikace prototypu samostatného nouzového svítidla napájeným záložním zdrojem nové generace (superkapacitorem) při provozní teplotě (kolem 25 – 30 °C) je proces samovybíjení podstatný a nezanedbatelný. U samostatného nouzového svítidla se ovšem nepředpokládá hluboký stav nabití a vybití, který je dán aktuálním odběrem a nabíjecím proudem. Průměrný pokles 3% za hodinu nepůsobí a neohroží funkčnost vybíjení záložního zdroje v době nouzového stavu. Nabíjecí obvod superkapacitoru v případě výraznějšího poklesu automaticky začne dobíjet energetickou ztrátu způsobenou samovybíjením. Koncept napájení nouzového svítidla pomocí superkapacitorů tedy samovybíjení ovlivní jen zanedbatelně, protože maximální využitelné množství naakumulované energie je také závislé na provozních vlastnostech elektronických částí nabíjecího a napájecího obvodu. [23], [24], [26], [27]

3.3.2. Teplotní závislost parametrů superkapacitoru

Dodávaný výkon do osvětlovacího segmentu (optická část a světelný zdroj) prototypu samostatného nouzového svítidla musí být stabilní i při širokém rozpětí provozních teplot. Rozsah použitelnosti superkapacitorů v různých tepelných prostředích je převážně ovlivněn bodem tuhnutí elektrolytu.

Teplotní rozpětí, kdy je funkce superkapacitorů provozována jmenovitými parametry zobrazena na níže uvedeném grafu (standardně od -40°C až +65°C). Z níže uvedeného grafu je patrná skutečnost, že vyšší pracovní teploty nemají markantní vliv na výrobu dané vnitřní parametry superkapacitoru

(kapacitu a ESR – sériový náhradní odpor neboli ekvivalentní sériový odpor). [19], [20], [23], [24], [26]



Obr. 27: Teplotní závislost kapacity a vnitřní rezistence [26]

Aplikace samostatného nouzového svítidla odebírá v době provozního stavu ze superkapacitoru nízký pracovní proud (řádově desítky ampér), proto je parametr ESR (ekvivalentní sériový odpor) nedůležitý. Ztráty projevující se vlivem ESR jsou markantní při odebírání vyšších pracovních proudů. (řádově stovky až desítky ampér). Vliv teploty na kapacitu superkapacitoru je minimální.

Běžné konvenční akumulátorové články jsou omezeny maximální provozní teplotou (většinou maximálně do $+50^{\circ}\text{C}$), která je nižší než u aplikací napájených superkapacitorem ($+65^{\circ}\text{C}$). Proto je použití superkapacitorů v podobě záložních zdrojů nejefektivnější při proměnlivých provozních teplotních stavech. Vlastní oteplení superkapacitorů při práci s malými provozními proudy je zanedbatelné. [23], [24], [26], [35]

3.3.3. Působení teploty a napětí na životnost superkapacitoru

Životnost superkapacitoru je dlouhodobě ovlivňována nabíjecím napětím a provozní a skladovací teplotou. Použitím superkapacitoru v záložních zdrojích je potřebné udržovat hladinu pracovního napětí na jmenovitých hodnotách pro maximální využití naakumulované energie.

Při jmenovitém napětí 2,7V a provozní teplotě 25°C je po 88 000 hodinách (cca 10 let) úroveň maximální uvažované kapacity menší o 15%. Zvýšením teploty o každých 10°C se úbytek zapříčiněný degradací kapacity dvakrát násobí (např. při teplotě 35°C je provozní kapacita snížena za dobu 44 000 hodin).

Uvažovaný koncept napájení nouzového svítidla superkapacitorem předpokládá maximální provozní teplotu do 35°C . Degradace kapacity po dobu deseti let provozního stavu bude maximálně 30%. [24], [26], [35]

3.3.4. ESR (ekvivalentní sériový odpor)

Podíl ESR na ztrátách v superkapacitoru je závislý na aktuálním odebíraném pracovním proudu. Aplikace napájení prototypu nouzového osvětlení pomocí superkapacitoru odebírá ze zdroje elektrické energie nízký pracovní proud (řádově desetiny ampéru, protože příkon uvažovaného světelného zdroje je pouze 1W). Parametr ESR je také závislý na použité výrobní technologii a pro efektivitu celého systému je nedůležitý.

Životnost superkapacitoru je specifická vlastnost definovaná výrobcem. Časový úsek, po který je superkapacitor schopný plnit požadovanou funkci (pokles vlastní kapacity o 20% jmenovité hodnoty nebo se ESR zvýší o 200%).

140% nárůst ESR		
provozní napětí [V]	provozní teplota [°C]	dosažení 30% degradace [h]
2,7	65	5 500
2,7	55	11 000
2,7	45	22 000
2,7	35	44 000
2,7	25	88 000

Tab. 5: Degradace a nárůst ESR v závislosti na provozním napětím a teplotou [26]

Při jmenovitém napětí 2,7V a provozní teplotě 25°C je po 88 000 hodinách (cca 10 let) úroveň maximální uvažované kapacity menší o 15% s nárůstem ekvivalentního sériového odporu o 140%. [23], [26], [27]

3.3.5. Nabíjecí a vybíjecí cyklus superkapacitoru

Četnost nabíjecích a vybíjecích cyklů se také negativně podílí na ovlivnění degradace (úbytku) kapacity superkapacitoru. Podle studie výzkumů firmy Maxwell má superkapacitor za přibližně 1 000 000 cyklů následek degradaci pracovní kapacity cca 20%.

Použitím superkapacitoru jako záložního zdroje napájení nouzového svítidla počítá za dobu jmenovité životnosti zařízení s maximálně 1 000 cykly (nabití a vybití). Počet cyklů pro aplikaci prototypu nouzového svítidla nemá na významnou degradaci kapacity vliv.

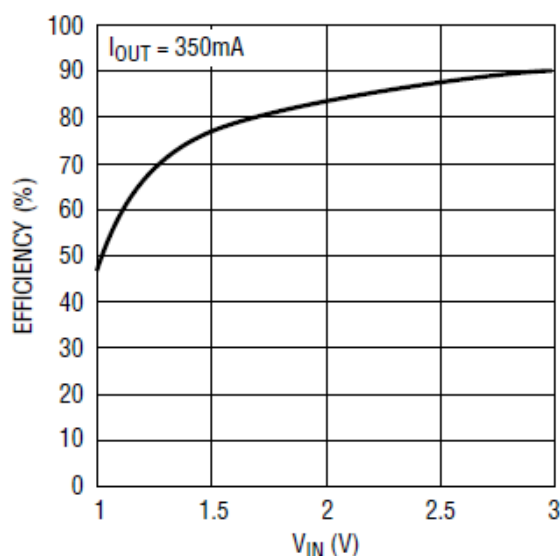
Vysoká životnost superkapacitoru předurčuje menší finanční nároky na výměnu napájecího zdroje (zdroj není nutné měnit po celou dobu provozu nouzového svítidla, protože životnost světelného zdroje, elektrických součástek a obvodů je téměř shodná s životností superkapacitoru). Tento aspekt přináší výhodu v možnosti pevné instalace ke svítidlu (samostatné nouzové svítidlo), ale z hlediska nadměrné velikosti a rozměrů uvažovaného superkapacitoru bude možné využít superkapacitor jen do míst s větším úložným prostorem. Provozní náklady na údržbu komplexního nouzového svítidla jsou tímto řešením značně redukovány.

Patřičnou výhodou superkapacitorů je vysoká účinnost nabíjecích a vybíjecích period. Energie se neuchovává v podobě chemických reakcí jako u konvenčních akumulátorů, ale v podobě elektrického náboje. V aplikacích s malými odběrovými proudy celkově dosahuje účinnosti až cca

98% (99% nabíjecí a vybíjecí cyklus). Tento faktor umožňuje dosáhnout velmi vysoké efektivity celého provozovaného systému, a proto se nachází v napájení prototypu superkapacitorem vysoký potenciál. [16], [24], [26], [35]

3.4. Výpočet kapacity superkapacitoru pro záložní zdroj nouzového svítidla

S ohledem na velikost pracovní kapacity musí být zajištěna požadovaná doba svícení nouzového svítidla. Naakumulovaná energie dodávaná ke světelnému zdroji je limitovaná minimálním pracovním napětím měniče, který je výrobcem stanoven na 0,9 V. Z uvedeného tvrzení vyplývá, že aplikace sloužící pro napájení výkonové LED diody umožňuje využít pouze 2/3 celkové naakumulované energie, protože maximální počáteční napětí nabitého superkapacitoru je na úrovni 2,7V. Dovolенý pracovní pokles superkapacitoru je ovlivněn minimálním pracovním napětím měniče a maximálním počátečním napětím nabitého článku, který v případě použití superkapacitoru Maxwell BCAP3000 je vypočítán na 1,8V.



Obr. 28: Závislost účinnosti na vstupní napětí LED driveru LTC3490 [34]

Účinnost přenosu energie je závislá na hodnotě napětí vstupujícího do LED driveru. Se zmenšujícím se napětím klesá podle níže uvedené charakteristiky přibližně exponenciálně. Do výpočtu potřebné kapacity superkapacitoru pro napájení výkonové LED diody byl zahrnut činitel stárnutí, jehož hodnotu je nutné podělit experimentálně vypočítanou hodnotou superkapacitoru. Výpočet velikosti superkapacitoru následuje po návrhu obvodu napájecího obvodu světelného zdroje nouzového svítidla:

Minimální pracovní napětí měniče:

$$U_{MIN} = 0,9 \text{ [V]}$$

Počáteční napětí maximálně nabitého článku:

$$U_0 = 2,7 \text{ [V]}$$

Dovolенý pokles napětí superkapacitoru [35]:

$$\Delta V = U_O - U_{MIN} \quad [\text{V}] \quad (3.4.1)$$

$$\Delta V = 2,7 - 0,9 = 1,8 \quad [\text{V}]$$

Odebíraný konstantní příkon LED diodou:

$$P_2 = 1 \quad [\text{W}]$$

Účinnost LED driveru:

$$\eta_{LDVR} = 0,8 \quad [-]$$

Průměrný odebíraný proud [35]:

$$I_{AVG} = \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} = \frac{\frac{1}{U_{MIN} \cdot \eta_{LDVR}} + \frac{1}{U_0 \cdot \eta_{LDVR}}}{2} \quad [\text{A}] \quad (3.4.2)$$

$$I_{AVG} = \frac{\frac{1}{0,9 \cdot 0,8} + \frac{1}{2,7 \cdot 0,8}}{2} = 0,926 \quad [\text{A}]$$

Činitel stárnutí superkapacitoru (za 10 let):

$$k = 0,8 \quad [-]$$

Požadovaná doba svícení svítidla:

$$t = 3600 \quad [\text{s}]$$

Vybíjecí charakteristika superkapacitoru [35]:

$$dU = i \cdot \frac{dt}{C} + i \cdot R_{ESR} \quad (3.4.3)$$

Jak bylo zdůvodněno výše, zanedbáme složku úbytku napětí na vnitřním odporu. Protože proud bude klesat téměř lineárně, nahradíme okamžitý proud i proudem průměrným I_{AVG} a vyjádříme kapacitu [35]:

$$C = \frac{I_{AVG} \cdot t}{\Delta U} \quad [\text{F}] \quad (3.4.4)$$

$$C = \frac{0,926 \cdot 3600}{1,8} = 1852 \quad [\text{F}]$$

Kromě toho je nutné zohlednit projektovanou životnost za 10 let (0,8) [35]:

$$C_{VYS} = \frac{C}{k} \quad [\text{F}] \quad (3.4.5)$$

$$C_{rys} = \frac{1854}{0,8} = 2315 \text{ [F]}$$

Z aktuální nabídky výrobců superkapacitorů je zvolen 1 kus Maxwell BCAP3000. [28], [35]

4. Prototyp nouzového svítidla napájeného superkapacitorem

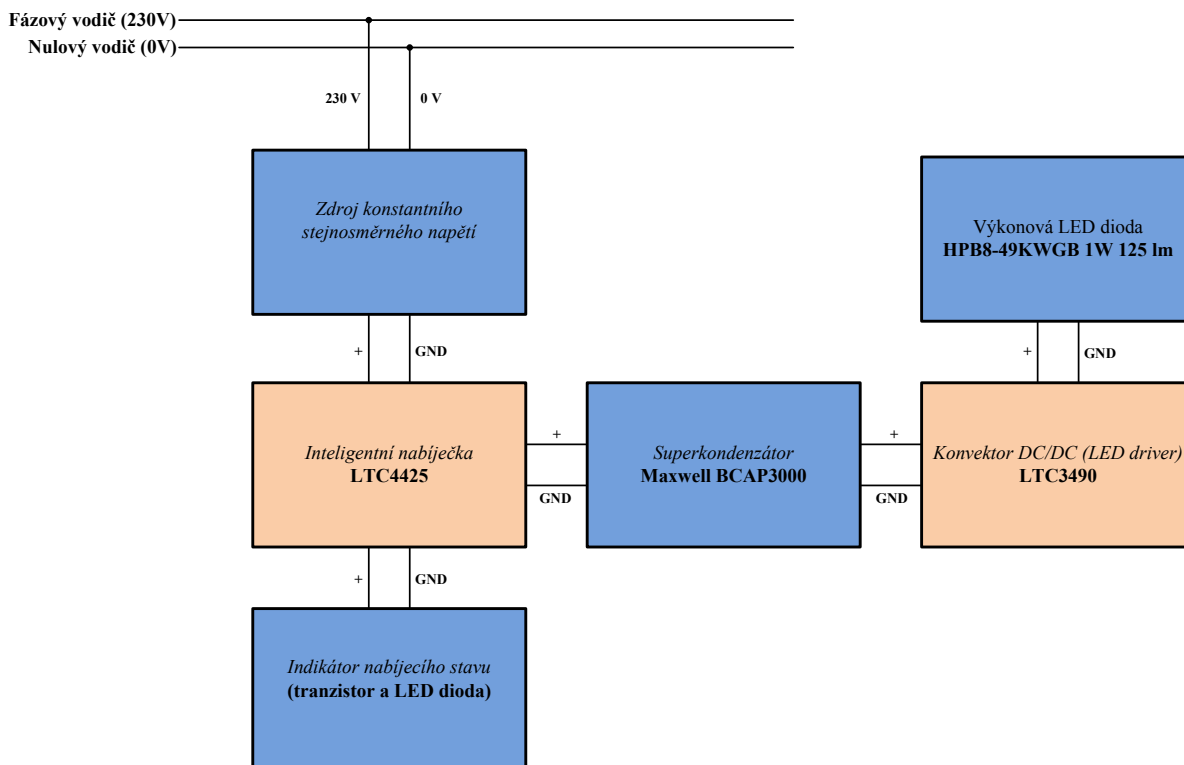
Prototyp samostatného nouzového svítidla je navrhován v souladu s nejnovějšími technologiemi v oblasti elektrotechniky a světelné techniky (superkapacitor a LED dioda s velkým měrným výkonem 125lm/W).

Hlavním úkolem tohoto bodu je konstrukce a návrh nabíjecího obvodu pro superkapacitor a napájecího obvodu pro koncový člen svítidla – výkonovou LED diodu. Pro nabíjecí a napájecí aplikace jsem použil produkty od firmy Linear Technology. Hlavním prvkem nabíjecího obvodu je inteligentní nabíječka LTC4425 a napájecího obvodu LED driver LTC3490.

4.1. Návrh a výroba elektronické části prototypu nouzového svítidla

4.1.1. Úvod do obecné problematiky elektronického zapojení

Trh s elektronickými obvody a součástkami v dnešní době disponuje širokým spektrem požadovaných funkcí a parametrů pro navrhnutí systému samostatného nouzového svítidla napájeného superkapacitorem. Realizace návrhu elektronického zapojení a výběr vhodných prvků do pracovního obvodu samostatného nouzového svítidla jsou zásadní pro stabilitu, funkčnost a efektivní předání elektrické energie v systému.



Obr. 29: Blokové schéma prototypu nouzového svítidla

4.1.2. Návrh nabíjecího obvodu superkapacitoru

Z jednofázových přívodních svorek (fázový a nulový vodič) je napájen nabíjecí obvod, který je vybaven stabilizovaným zdrojem napětí, přičemž platí, že napětí tohoto zdroje je ideálně konstantní při proměnlivém odebíraném proudu. Transformovanou stejnosměrnou energií konstantních parametrů je napájena nabíječka.

V nabíjecím návrhu je důležité uplatnit integrovaný obvod, jenž automaticky řídí a reguluje napětí a proud pomocí externích součástek. Koncový element nabíjecího obvodu – superkapacitor je limitován pracovním výstupním napětím 2,7 V. Případné přebíjení má významný vliv na jeho dobu života. Z hlediska nabíjecího proudu je nutné řídit se podle normy ČSN EN 50172.

Inteligentní nabíječka může být vlivem průchodu nabíjecího proudu nebezpečně oteplena nad mez nevratné degradace. Proto je vybavena ochranou teplotní smyčkou. V konečném důsledku tato smyčka omezuje hodnotu nabíjecího proudu a tím i čas nabití superkapacitoru. Integrovaný obvod inteligentní nabíječky je primárně určen pro nabíjení akumulátorových článků, kondenzátorů a superkapacitorů (doporučuje se okolo 100F) s akumulacími kapacitami o řád menších než superkapacitor použitý v aplikaci realizované v této diplomové práci (3000F). Jakmile superkapacitor dosáhne jmenovitého limitního nabití, obvod automaticky vypne nabíjecí režim. Indikace nabíjecího a provozního stavu je zobrazena na pomocných LED diodách odlišných barev. [35]

4.1.3. Návrh napájecího obvodu pro výkonovou LED

V návrhu je nutné uplatnit elektrické parametry DC/DC konvektoru, protože napětí na superkapacitoru v průběhu vybíjecího procesu klesá od maximální hodnoty k nule. Základní vlastností DC/DC konvektoru, neboli stejnosměrného měniče, je zajištění požadované změny velikosti stejnosměrného napětí nebo proudu na konstantní výstupní hodnotě s největší účinností přenosu energie. Výběr přijatelného DC/DC konvektoru je pro naši aplikaci ovlivněn minimálním rozsahem vstupního napětí, který rozhoduje o celkovém objemu využitelné energie ze superkapacitoru. Pro vysokou efektivitu předání energie musí DC/DC konvektor splňovat kritérium co největší účinnosti při daném konstantním proudu a rozsahu proměnlivých vstupních napětí.

Prostřednictvím konstantního výstupního proudu z DC/DC konvektoru je zajištěno konstantní vyzařování světelného toku (kvantitativní parametr světelného zdroje). Z voltampérové charakteristiky LED diody plyne fakt, že pokud bude DC/DC konvektor řízený konstantním výstupním napětím, proud procházející výkonovou LED diodou může fluktuovat působením technologických výrobních tolerancí a zahříváním PN přechodu.

Aktuální analýza prvků aplikace napájení nouzového osvětlení pomocí superkapacitorů je nejefektivnější při použití jednoho superkapacitoru pro napájení 1W výkonové LED diody anebo dvou kusů sériově řazených pro vyšší hodnoty příkonu LED.

V dnešní době disponuje trh především DC/DC konvektory řízenými konstantním výstupním napětím. Tato varianta je pro aplikaci napájení výkonové LED diody nevhodná, a sice z toho důvodu, že pokud bude na DC/DC konvektoru řízen konstantní výstupní proud, pak bude nutné do výstupního obvodu zařadit snímací rezistor nebo tranzistor, na kterém vznikají výkonové ztráty. Zařazením snímacího členu je snižován užitečný čas provozu samostatného nouzového svítidla. Nejhorší variantou pro vytvoření konstantního proudu je vsadit do obvodu mezi DC/DC konvektor a výkonovou LED diodu zdroj konstantního proudu s integrovaným stabilizátorem. Účinnost těchto elektronických prvků

se pohybuje okolo 66%. Nejefektivnější způsob napájení výkonové LED diody je vykazován za použití LED driveru LTC3490, který dodává diodě konstantní proud při snižujícím se napětí na superkapacitoru až do mezní hodnoty, která LED driver vypne. Při dosažení limitního napětí okolo 0,9 V na superkapacitoru LED driver automaticky vypíná svou funkci a světelný zdroj přestává vyzařovat světelný tok. [35]

4.1.4. Návrh vhodné LED diody

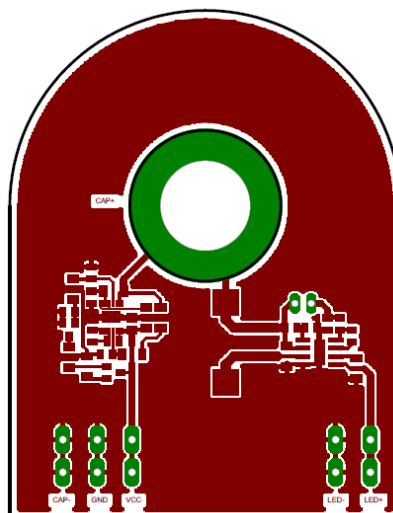
Výkonovou LED diodu je vhodné při výrobě otestovat a experimentálně stanovit odporovým děličem napětí pro LED diodu na hodnotu napětí, aby světelný tok za celou dobu svícení nouzového samostatného svítidla (jednotky hodin) neklesl pod stanovenou hodnotu. Jmenovité světelně-technické parametry LED diody budou zachovány při účinném chlazení článku. S předpokladem maximální doby svícení 1000 hodin nás snížení životnosti nelimituje. V aplikaci napájení nouzového osvětlení pomocí superkapacitoru má majoritní vliv na velikost doby svícení zvýšený proudový odběr výkonové LED diody. Čím je proudový odběr menší, tím je maximální doba svícení delší. Eliminaci vlivu zvýšené teploty na parametry LED diody je možné experimentálně vyzkoušet termistory, které mohou ovlivňovat výstupní napětí měniče na jmenovitých hodnotách.

Hodnota příkonu výkonové LED diody, elektronických řídicích obvodů a maximální doby svícení je stanovena na základě počtu superkapacitorových článků. Sériovým řazením dvou superkapacitorových článků je napětí rovné součtu jednotlivých článků. Celkovým napětím na článcích je snižována hodnota proudu, která protéká obvodem měniče, tedy vyšší vstupní napětí vede ke snížení vnitřních Jouleových ztrát v měniči. Nevýhodou řešení s použitím dvou superkapacitorů je vyšší dvojnásobná cena zdroje energie a (poloviční velikost kapacity).

Podle normy ČSN EN je nutné indikovat stav nabíjení superkapacitoru kontrolujícími aktuální nabíjecí proud, a to buď zeleným, nebo červeným světelným zdrojem. Aplikace je rovněž vybavena indikací stavu napájecího napětí na střídavé síti.

4.2. Výroba plošného spoje nabíjecího a napájecího obvodu

Deska plošného spoje zprostředkující funkci napájení, nabíjení a indikování výstupních částí prototypu nouzového svítidla (superkapacitor, výkonová LED dioda a signalizační dvoubarevná dioda), byla dimenzována a vyvíjena v prostředí software EAGLE 6.1. Základním materiálem pro tvorbu desek plošného spoje byl použit laminát ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí a oboustranně polepenou měděnou fólií. Jedna strana fólie slouží k chlazení prostřednictvím tepelně vodivého obalu superkapacitoru, který je vyroben z hliníku. Tepelný odpor mezi povrchem superkapacitoru a zadní stranou desky plošného spoje musí být co nejmenší. V ideálním případě jsou nerovnosti kontaktů srovnány tepelně vodivou pastou. Část věnovaná chlazení byla vyvíjena s maximální svědomitostí, protože použité integrované obvody (LTC4452 a LTC3490) plnící hlavní funkce jsou enormně závislé na vlivu teploty. Jejich účinnost strmě klesá se zvyšující se teplotou a při dosažení určité teploty je jejich funkce automaticky vypnuta. Na druhou stranu fólie jsou vyleptány elektrické cesty propojující jednotlivé logické a hlavní podpůrné segmenty. Veškeré součásti jsou v napájecím a nabíjecím obvodu řešeny prostřednictvím SMD technologie, která zaručuje spolehlivost a minimální rozměry.



Obr. 30: Výstupní projekce plošného spoje nabíjecího a napájecího obvodu

Rozměry plošného spoje byly uzpůsobeny v souladu s velikostí superkapacitoru a s co největší možnou chladicí plochou. Deska vysoká 76 mm a široká 61 mm. Vnitřní průměr činí 14 mm. Kolem vnitřní kružnice byla projektována měděná kruhová výseč s průměrem 5 mm. Vnitřní výřez a výseč je primárně vytvořena pro uchycení kladného pólu superkapacitoru pomocí podložky a matice příslušné velikosti. Pomocí těchto úchytných prostředků je docílen potřebný vodivý kontakt mezi měděnou plochou a kladným pólem superkapacitoru. Obdélníkové prodloužení desky plošného spoje bylo vytvořeno pro dva vstupní a tři výstupní konektory, protože je nutno elektrické kontakty oboustranně pájet. První konektor z levé strany umožňuje přizemnění minusového pólu superkapacitoru. Na druhém a třetím konektoru jsou připojeny napájecí vodiče ze stejnosměrného stabilizovaného zdroje určené pro nabíjení superkapacitoru. Dva pravé konektory slouží k připojení výstupního členu prototypu nouzového svítidla – výkonové LED diody.

4.3. Simulační posloupnost procesu vybíjení superkapacitoru

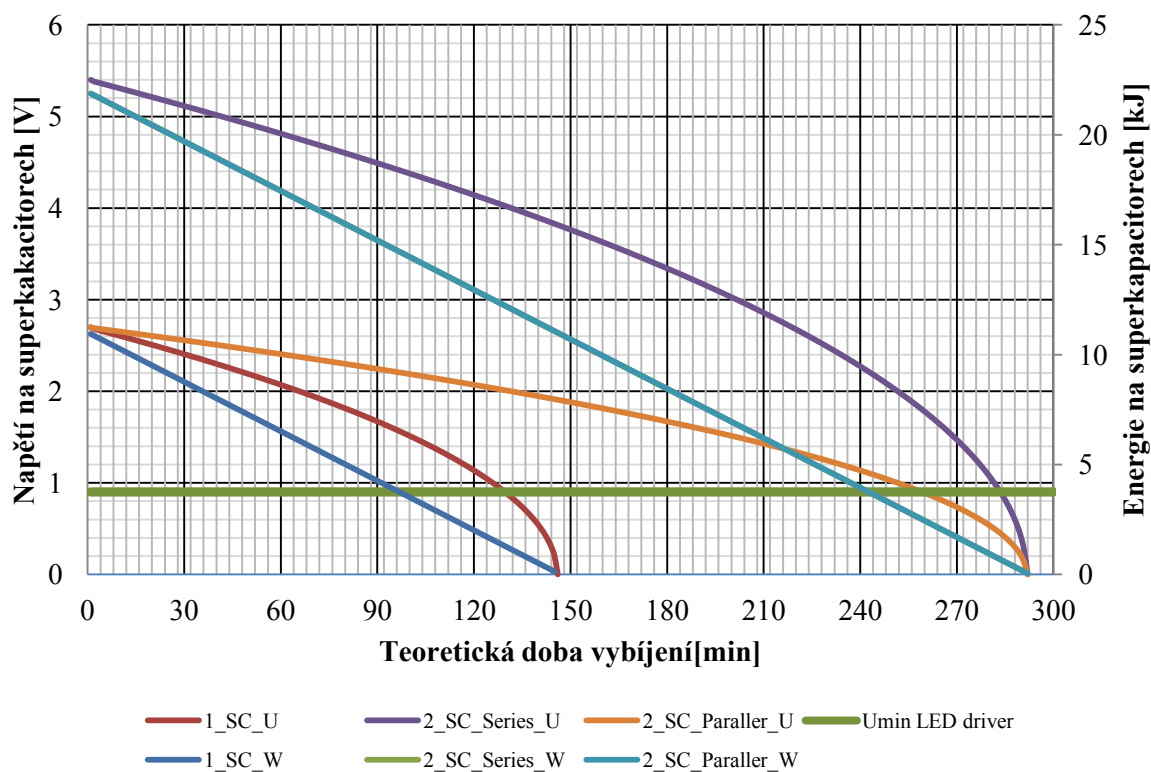
Teoretickým vyjádřením vybíjecího procesu na superkapacitorech s kapacitou 3000 F a maximálním provozním napětím 2,7 V byla ověřena vhodnost možného zapojení pouze s jedním nebo dvěma superkapacitory. Pro napájení LED diody s elektrickým příkonem 1 W je dostačující jeden superkapacitor s uvažovanou dobou svícení na dobu minimálně 1 hodiny. Veškeré algoritmy a výpočty byly simulovány ve výpočetním software Excel 07. Maximální možná naakumulovaná energie s použitím jednoho superkapacitoru je [26]:

- | | |
|--|--------|
| • napětí | 2,7 V |
| • kapacita | 3000 F |
| • příkon LED | 1 W |
| • průměrná účinnost LED driveru | 80 % |
| • skutečný příkon přijímaný LED driverem | 1,25 W |

$$W_{LK} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_1^2 \quad [\text{J}] \quad (4.3.1)$$

$$W_{LK} = \frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot 2,7^2 = 10935 \text{ [J]}$$

V původních úvahách bylo uvažováno o výkonové LED diodě s příkonem 5 W. Pro tento typ světelného zdroje je ovšem nutné použít nejlépe dvou sériově řazených superkapacitorů Maxwell BCAP3000, protože energetická náročnost při uvedeném příkonu a uvažované účinnosti LED driveru průměrně 80% nestačí na normou stanovenou dobu svícení v minimální výši 1h pro nouzové únikové cesty. Také varianta s použitím dvou superkapacitorů je finančně náročnější a v největší míře ovlivňuje celkovou cenu samostatného nouzového svítidla.



Obr. 31: Simulace vybíjení energie a napětí na superkapacitorech

Maximální možná naakumulovaná energie s použitím dvou superkapacitorů v sériovém zapojení [35]:

- napětí v sériovém zapojení **5,4 V**
- kapacita v sériovém zapojení **1500 F**
- příkon LED **1 W**
- průměrná účinnost LED driveru **80 %**
- skutečný příkon přijímaný LED driverem **1,25 W**

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot U_s^2 \text{ [J]} \quad (4.3.2)$$

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot 5,4^2 = 21870 \text{ [J]}$$

Maximální možná naakumulovaná energie s použitím dvou superkapacitorů v paralelním zapojení [35]:

- napětí v paralelním zapojení **2,7 V**
- kapacita v paralelním zapojení **6000 F**
- příkon LED **1 W**
- průměrná účinnost LED driveru **80 %**
- skutečný příkon přijímaný LED driverem **1,25 W**

$$W_P = \frac{1}{2} \cdot C_P \cdot U_P^2 \quad [\text{J}] \quad (3.4.3)$$

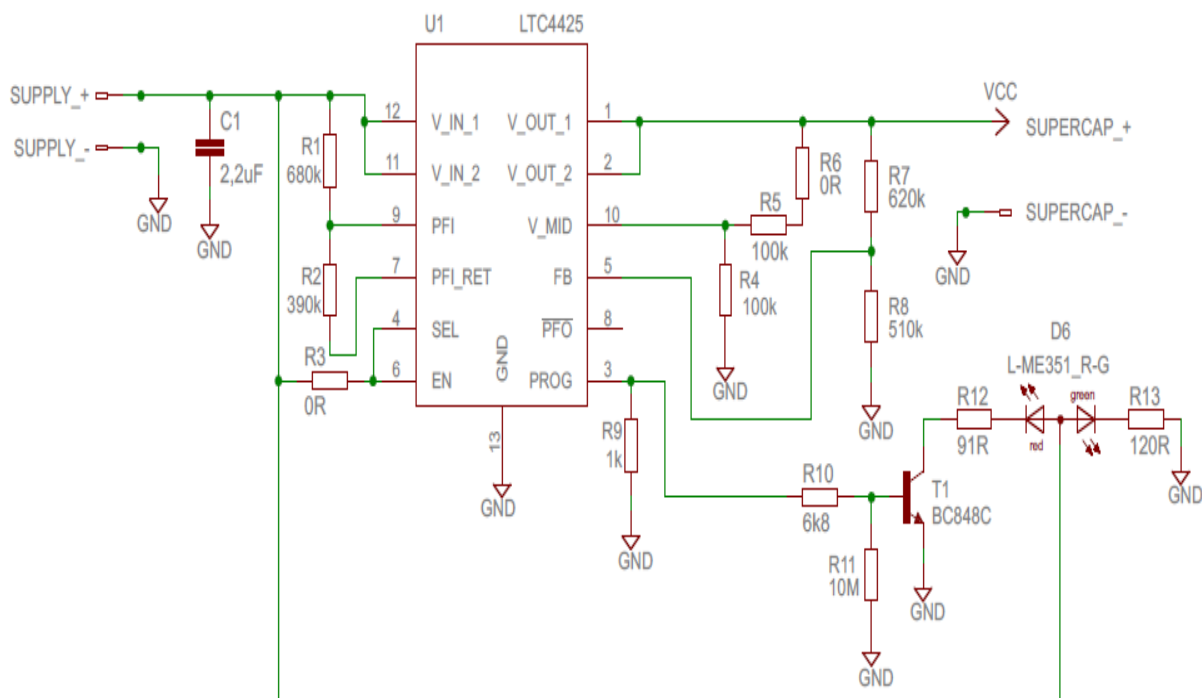
$$W_P = \frac{1}{2} \cdot 6000 \cdot 2,7^2 = 21870 \quad [\text{J}]$$

Uvedený graf potvrzuje možnost napájet 1 W výkonovou diodu pouze s jedním superkapacitorem. Při nejvyšší hodnotě naakumulované energie 10935 J je teoreticky vybit za 146 minut. Jelikož je přenos energie LED driveru limitován minimálním pracovním napětím na hodnotě 0,9 V, tak je doba teoretického provozního vybíjení rovna 126 minutám. Z tohoto faktu vyplývá, že v superkapacitoru zůstane nevyužito přibližně 33% energie. Při těchto úvahách nebylo uvažováno s přídatnými ztrátami způsobenými průchodem proudu pasivních součástek a LED driverem. V paralelním anebo sériovém zapojení jsou teoreticky superkapacity nabity na stejnou hladinu elektrické energie, proto je v grafu uvedeno jen 5 křivek. V použitém zapojení se liší pouze maximální hodnotou napětí a kapacitou.

4.4. Konstrukce nabíjecího obvodu superkapacitoru

Nejdůležitějším aspektem při návrhu nabíjecího obvodu je maximální nabíjecí doba, kterou norma ČSN EN 60598-2-22 stanovuje pro napájecí zdroje samostatných nouzových svítidel na 24 hodin. Základní část nabíjecího obvodu tvoří integrovaný obvod LTC4425 od firmy Linear Technology. Primárně je navržen pro nabíjení superkapacitorů. Jeho správná funkce je řízena pomocí podružných pasivních součástek, kterými obvod řídí maximální nabíjecí proud, maximální výstupní napětí a indikaci provozních stavů. Nabíjecí obvod se skládá z následujících částí:

- inteligentní nabíječka LTC4425
- spínaný stabilizovaný zdroj
- napěťové děliče
- filtrační kondenzátory
- tranzistor NPN
- dvoubarevná indikační LED dioda
- vstupní a výstupní konektory



Obr. 32: Schéma nabíjecího obvodu v EAGLE

4.4.1. Spínaný stabilizovaný napájecí zdroj

Samostatné svítidlo nouzového osvětlení musí být vybaveno zařízením, které umožňuje převod střídavé energie na stejnosměrnou. Nejlepší alternativou pro aplikaci je spínaný stabilizovaný zdroj. Střídavé napětí, které má v České republice parametry 230V / 50 Hz je usměrněno a filtrováno. Širokopásmový filtr zabráňuje pronikání rušivých signálů ze zdroje do sítě. Elektronický spínač (výkonový tranzistor) rozkouskuje vyfiltrované a usměrněné napětí na pulsní napětí o frekvenci 40 – 200 kHz.



Obr. 33: *Stabilizovaný napájecí zdroj [49]*

Amplituda rozkouskovaného napětí je rovna druhé odmocnině vstupního napětí. Napětí je transformováno pomocí vysokofrekvenčního transformátoru s feritovým jádrem, usměrněno Schottkyho diodami a filtrováno filtrem na potřebnou výstupní velikost stabilizovaného napětí. Výhody použití spínaného stabilizovaného napájecího zdroje:

- malé rozměry (zejména velikost transformátoru, který má ve srovnání se síťovým transformátorem shodného výkonu mnohonásobně menší velikost)
- menší hmotnost, než u lineárních napájecích zdrojů
- vysoká účinnost 85 – 95 %
- možnost pokrýt krátkodobé výpadky napájecího napětí (200 ms)

- pořizovací cena není ovlivněna požadovaným výstupním výkonem

Nevýhody použití spínaného stabilizovaného napájecího zdroje:

- větší zvlnění výstupního napětí, než u lineárních napájecích zdrojů
- může být zdrojem rušivých signálů

Ačkoli mají spínané stabilizované napájecí zdroje nevýhody, jejich výhody převyšují a v průmyslu se používají pouze tyto typy.

4.4.1.1. Parametry spínaného stabilizovaného zdroje použitého v aplikaci napájení nouzového osvětlení

Stabilizovaný zdroj funkčně určený pro napájení superkapacitoru je charakterizovaný vysokou účinností a nízkou vlastní spotřebou. Vnější kryt je při provozním stavu chlazen cirkulací přirozeného vzduchu. Zdroj je vybaven automatickou zkratovou, přepětíovou ochranou a ochranou vypínající obvod před ztrátou zatížení. [30], [31], [49]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výstup	Stabilizovaný	[-]
Výstupní napětí	3,3 DC	[V]
Výstupní proud	2000	[mA]
Typ	Spínaný	[-]
Vstupní napětí	100 - 240 AC	[V]
Frekvence napětí	50	[Hz]
Provedení	Síťová vidlice	[-]
Provozní teplota	0 - 40	[°C]
Rozměry	69 x 27 x 38	[mm]

Tab. 6: Parametry napájecího zdroje [49]

4.4.2. Inteligentní nabíječka použitá v elektronickém obvodě

LTC4425 je proudově-napětíová konstantní lineární nabíječka, která slouží pro nabíjení až dvou akumulátorových článků, kondenzátorů a superkapacitorů. Integrovaný obvod nabízí k funkci nabíjení dva provozní režimy:

- normální režim
- režim LDO

V normálním režimu nabíjecího proudu se nabíjí vysokokapacitní články stejnou hodnotou jako vstupní napětí s nabíjecím proudem, který je udržován v závislosti na vstupně výstupním rozdílu napětí. V LDO režimu jsou nabíjeny vysokokapacitní články pevně nastaveným výstupním napětím prostřednictvím odporového děliče s konstantním nabíjecím proudem, který je také na plošném spoji pevně nastaven pomocí velikosti externího rezistoru.

Integrovaný obvod LTC4425 je vybaven teplotní regulací sloužící k chránění před nadměrným přehříváním. V obou režimech je mezní teplota sepnutí regulační smyčky nastavena na 105 °C. Tento

důvod omezuje libovolné osazení na plošném spoji. Teplotní regulátor automaticky snižuje nabíjecí proud k udržení maximální dovolené teploty 105 °C. Pokud se provozní teplota pohybuje na hranici meze 160 °C, obvod automaticky ukončí nabíjecí stav. Obnovení nabíjecí funkce automaticky započne, když teplota klesne o 14 °C, tedy přibližně 146 °C. Protože je maximální provozní napětí na superkapacitoru omezeno na hodnotu maximálně 2,7 V, je nutné naprogramovat výstupní napětí na integrovaném obvodu LTC4425 pomocí externích rezistorů.



Obr. 34: Integrovaný obvod LTC4425 [51]

Pro nabíjení superkapacitoru bylo využito režimu LDO, který umožňuje regulovat výstupní napětí superkapacitoru na požadované hodnotě (pro mou aplikaci 2,7 V) a nastavení maximálního omezení nabíjecího proudu. [29]

4.4.2.1. Nastavení vstupního a výstupního napětí inteligentní nabíječky

Pomocí napětíového děliče byla naprogramována hodnota výstupního napětí. Výrobce inteligentní nabíječky doporučuje hodnoty externích dělicích rezistorů nastavovat v limitu 40k až 1M.

Hodnota zpětnovazebního napětí V_{FB} je vnitřními procesy v integrovaném obvodu udržovaná na 1,2V. Tímto napětím je monitorována požadovaná výstupní hodnota napětí, která je v našem případě nastavena na maximální provozní hodnotu superkapacitoru 2,7 V [29]:

$$V_{OUTN} = V_{FB} \cdot \left(1 + \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}}\right) \quad [\text{k}\Omega] \quad (4.4.2.1)$$

Postup výpočtu je řešen pevným zvolením rezistoru R_{FB1} v řadě E12 na hodnotu 620 k Ω a druhá hodnota rezistoru R_{FB2} se vypočítá rovnicí:

$$R_{FB2} = \frac{R_{FB1}}{\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1} \quad [\text{k}\Omega]$$

$$R_{FB2} = \frac{620000}{\frac{2,7}{1,2} - 1} = 496000 \cong 510000 = 510 \quad [\text{k}\Omega]$$

Stejně jako v případě naprogramování hodnoty výstupního napětí je nastavena hodnota vstupního pracovního napětí pro inteligentní nabíječku superkapacitoru [29]:

$$V_{INN} = V_{PFI} \cdot \left(1 + \frac{R_{PF1}}{R_{PF2}}\right) \quad [\text{k}\Omega] \quad (4.4.2.2)$$

Postup výpočtu je řešen pevným zvolením rezistoru R_{PF1} v řadě E12 na hodnotu 680 k Ω a druhá hodnota rezistoru R_{PF2} se vypočítá rovnicí:

$$R_{FB2} = \frac{R_{FB1}}{\frac{V_{IN}}{V_{PFI}} - 1} \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (4.4.2.3)$$

$$R_{FB2} = \frac{680000}{\frac{3,3}{1,2} - 1} = 388571 \cong 390000 = 390 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

4.4.2.2. Nastavení nabíjecího proudu

Prostřednictvím externího odporu přivedeného na programovací pin integrovaného obvodu LTC4425 byla nastavena maximální hodnota nabíjecího proudu superkapacitoru. Vypočítaná hodnota externího odporu dostačuje pro nabití superkapacitoru Maxwell 3000BCAP do požadované doby 24 hodin, která je stanovena normou. [29]

$$R_{PROG} = 1000 \cdot \frac{1}{I_{CHRG}} \text{ [k}\Omega\text{]} \text{ [29]} \quad (4.4.2.4)$$

$$R_{PROG} = 1000 \cdot \frac{1}{1} = 1000 = 1 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

4.4.3. Indikátor nabíjecího režimu a napětí na síti

Norma ČSN EN 60598-2-22 požaduje, aby každé samostatné nouzové svítidlo bylo viditelně opatřeno indikátorem provozních stavů. Indikační struktura v nabíjecím obvodu je tvořena pomocí tranzistorové logiky. Na bázi tranzistoru NPN je připojen pin monitorovacího proudu (pin_{PROG}), na kterém je napětí 1 V, jestliže je superkapacitor nabíjen integrovaným obvodem LTC4425. Pro indikaci je použito tranzistoru BC848C otevírající svůj PN přechod kolektoru a emitoru, pokud je na bázi připojeno napětí minimálně 0,6 V. Na emitor byla přes ztrátový odpor připojena červená LED dioda, která plní indikaci nabíjecího stavu superkapacitoru. Nabíjecí obvod je mimo jiné vybaven zelenou LED diodou, která signalizuje napájecí napětí na střídavé síti.

4.4.4. Superkapacitor Maxwell BCAP3000

Pro znázornění základních parametrů superkapacitoru - Maxwell BCAP3000, použitého v aplikaci prototypu nouzového svítidla byla vytvořena tabulka obsahující informace z Datasheetu výrobce. [26], [32]



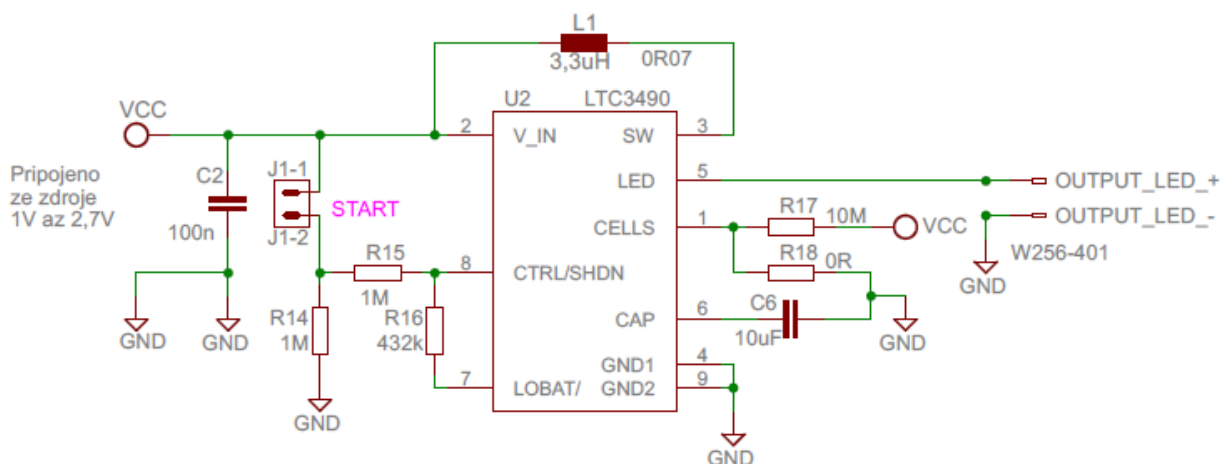
Obr. 35: Maxwell BCAP3000 [26]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Jmenovitá kapacita	3000	F
Maximální počáteční sériový odpor	0,29	mOhm
Jmenovité napětí	2,7	V
Maximální trvalý proud při $\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	130	A_{RMS}
Maximální trvalý proud při $\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	210	A_{RMS}
Maximální špičkový proud při 1s	2200	A
Minimální provozní teplota	-40	$^{\circ}\text{C}$
Maximální provozní teplota	65	$^{\circ}\text{C}$
Hmotnost	510	g
Měrný výkon	5900	W / kg
Maximální uložená energie	3,04	Wh
Měrná energie	6	Wh / kg
Počet cyklů	1 000 000	
Zkratový proud	9300	A

Tab. 7: Výrobní parametry superkapacitoru Maxwell BCAP300 [32]

4.5. Testování a měření indukčností pro napájecí obvod

Napájecí obvod pro světelný zdroj samostatného nouzového svítidla je tvořený LED driverem LTC3490 a pasivními součástkami, které v obvodu regulují požadované veličiny výstupního výkonu. Vybíjecí charakteristiky superkapacitoru a proudy protékající LED diodou jsou znázorněny pro přehlednost v grafech zpracovaných v programu Excel07.



Obr. 36: Napájecí obvod pro výkonovou LED diodu

Na základě stability napájecího obvodu byl zkoumán vliv hodnot rezistencí a fixního spínacího kmitočtu indukčnosti, kterými jsou:

- indukčnost - 3,3 μ H (vlastní rezistivita 3,3 m Ω)
- indukčnost - 3,3 μ H (vlastní rezistivita 6,6 m Ω)

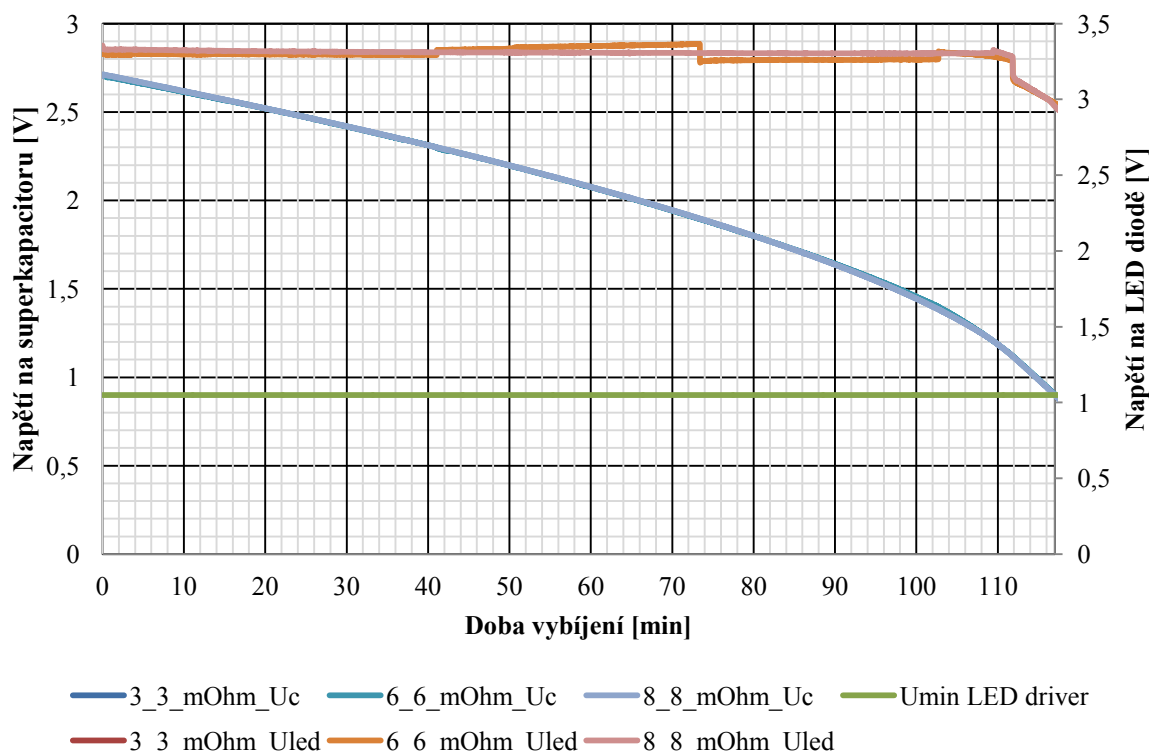
- indukčnost - 3,3 μ H (vlastní rezistivita 8,8 m Ω)

Testováním byl ověřen vliv vnitřní rezistence výše uvedených druhů indukčností, na kterých vznikají výkonové ztráty způsobené proudem napájející LED diodu. Parametry indukčnosti ovlivňují taktéž stabilitu LED driveru. V první části každého měření byl nabit superkapacitor na počáteční jmenovité napětí 2,7 V. Na testovací modul napájecího obvodu byla zapojena indukčnost s vnitřní rezistivitou 3, 3 a 6,6 a 8,8 m Ω . Prostřednictvím měřicí karty a software LabVIEW nahaném v PC byly změřeny úrovně napětí na superkapacitoru a výkonové LED diodě.

Indukčnost [μ H]	Vnitřní rezistivita [m Ω]	U_c [V]	U_{LED} [V]
3,3	3,3	1,14	3,226
3,3	6,6	1,125	3,243
3,3	8,8	1,028	3,073

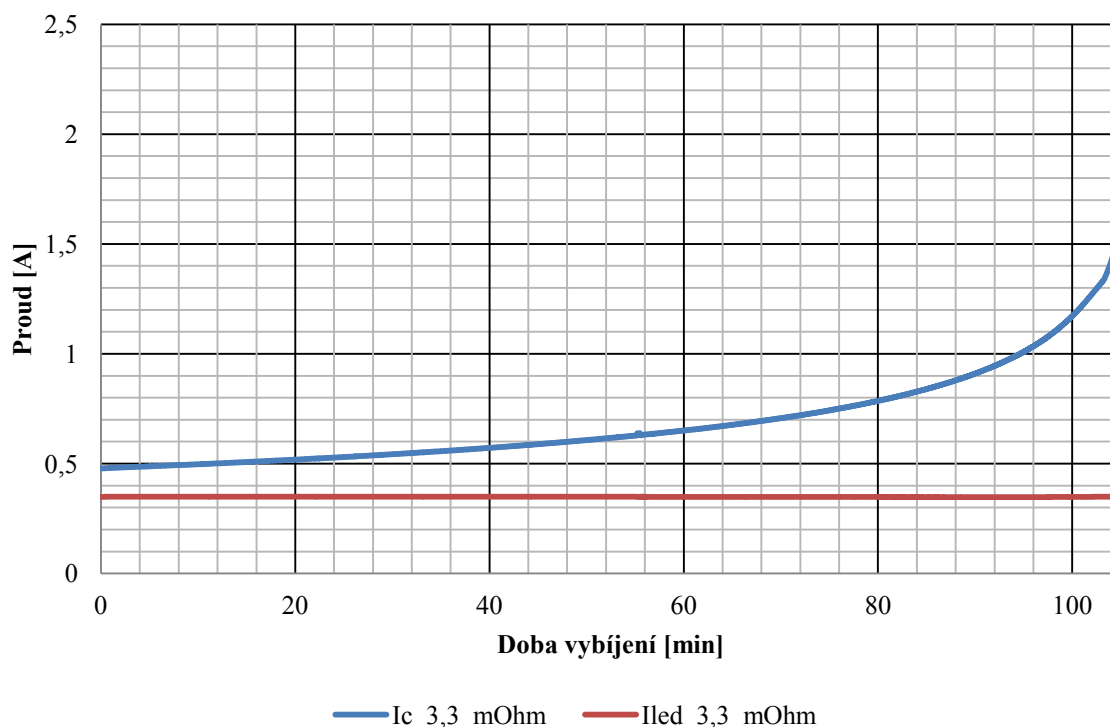
Tab. 8: Hodnoty napětí na superkapacitoru a LED diodě po 114 minutách

Ve vybíjecím čase 114 minut byla změřena hladina napětí na sledovaných součástích světelného a napájecího obvodu. Podle nejvyšší hodnoty napětí na superkapacitoru a výkonové LED diodě byla vhodně zvolena indukčnost s vnitřní rezistivitou 6,6 m Ω .



Obr. 37: Vliv rezistivity indukčnosti na napájení LED

Z grafu je patrné, že vybíjecí charakteristika napětí na superkapacitoru je u všech měřených indukčností prakticky totožná. Stabilita napětí na LED diodě je převážně ovlivněna teplotou PN přechodu a technologickým způsobem výroby.



Obr. 38: Vybíjecí proud superkapacitoru a napájecí proud LED diody

Při měření indukčnosti s nejmenší hodnotou rezistivity $3,3 \text{ m}\Omega$ byl experimentálně měřen také proud na superkapacitoru a výkonové LED diodě, ale z důvodu vznikajících úbytku napětí na měřicí kabeláži, kontaktech karty a bočnicích bylo toto měření nepřesné a tudíž nevyhodnotitelné, protože se úbytek napětí negativně podílel na krácení doby efektivního svícení (maximálnímu možnému využitelnému množství energie). Hodnota se transponovala k funkčnímu minimálnímu napětí ($0,9 \text{ V}$), při kterém je funkce LED driver automaticky vypnuta. I minimální úbytek napětí v řádu desetin mV ovlivní efektivní dobu svícení o několik minut.

Průběhy napětí všech měřených indukčností byly zaznamenávány do maximálně 117 minut. Po této době se již začaly projevovat parazitní kapacity a indukčnosti. LED driver začal oscilovat a přecházel do nestabilního stavu. Pro účely napájení prototypu s využitím superkapacitoru byla doba aktivního testování dostačující pro napájení samostatného nouzového svítidla (minimum doba svícení je 60 minut pro nouzové únikové cesty).

4.6. Plán údržby na prototypu samostatného svítidla

Jelikož bude konvenční akumulátorový zdroj v prototypu svítidla nahrazen řídicí elektronikou a superkapacitorem, odpadají podstatné provozní investice vynakládané do pravidelných servisních prohlídek a výměn záložních zdrojů. Doba života u prototypu svítidla je podstatně vyšší. U Systému nouzového osvětlení provádíme:

- denní prohlídky
- měsíční prohlídky a zkoušky
- roční prohlídky a zkoušky [7], [10]

4.6.1. Denní prohlídky

Oproti centrálnímu systému napájeného akumulátorem není nutné denně kontrolovat ukazatele činnosti. U prototypu nouzového svítidla napájeného alternativním zdrojem – superkapacitorem není zapotřebí provádět žádné denní zkoušky funkčního stavu. Z tohoto důvodu nám odpadá investiční část údržby. [7], [10]

4.6.2. Měsíční prohlídky a zkoušky

U svítidel napájených superkapacitorem bude jednou měsíčně nutné rozsvítit v nouzovém provozu každé svítidlo. V tomto provozu je simulován výpadek normálního osvětlení. Měsíční zkouška by měla být prováděna na základě minimalizace poškození součástí celého prototypu, hlavně světelného zdroje. Během stanoveného času daného ve výkladu normy ČSN EN 1838 pro osvětlování únikových cest a osvětlení protipanického prostoru a míst, kde jsou požární hlásiče a místa s první pomocí je nutné optickou část prototypu (reflektor a čočka z polykarbonátu) zkontrolovat, zda jsou řádně čisté a správně fungují. Na konci pravidelné měsíční zkoušky prototypu svítidla je nutné zapnout napájení normálního osvětlení, protože je nutné kontrolovat veškeré indikace stavu nabíjení superkapacitoru a obnovy normálního napájení. [7], [10]

4.6.3. Roční prohlídky a zkoušky

Měsíční prohlídky a zkoušky na prototypu jsou totožné s měsíčními zkouškami až na pár doplňujících testů. Každý prototyp uvedený do provozu musí být zkoušen jako při měsíční zkoušce, ale po celou dobu jmenovitého provozu. Napájení nouzového osvětlení musí samočinně vybavit indikační ukazatele při opětovném zapnutí normálního napájení. Datum provedení každé zkoušky a jejich provozního výsledku musí být zaevidováno v provozním deníku nouzové soustavy. [7], [10]

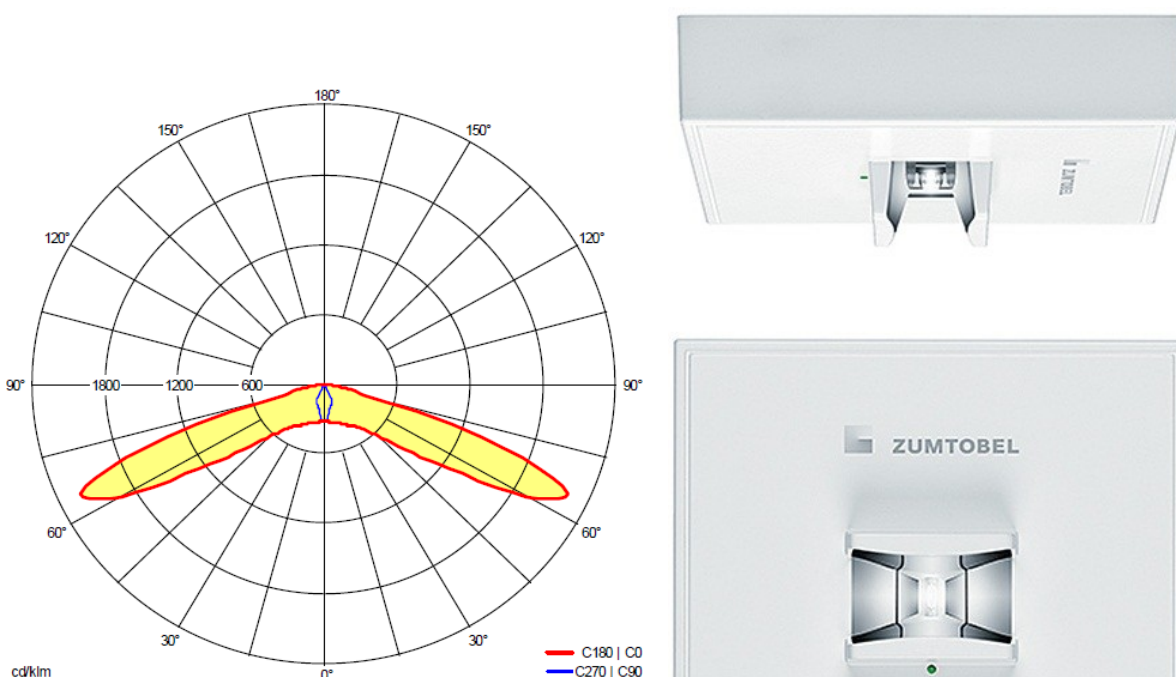
5. Hodnocení prototypu nouzového svítidla napájeného superkapacitorem

Aby bylo možné uvést prototyp nouzového svítidla do běžného provozu, je nutné realizovat elektrické a světelné měření, u kterých jsou jednoznačně prokázány možné výhody a nevýhody v použití pro specifické druhy prostředí (nouzové osvětlení únikových cest, protipanické osvětlení, náhradní osvětlení, osvětlení prostorů s velkým rizikem, osvětlení požárních hlásičů a míst s první pomocí). Naměřené parametry je rovněž vhodné porovnat a vyhodnotit ve výpočtovém software Relux Suite. Světelný zdroj prototypu nouzového svítidla (výkonová LED dioda) byl implementován do stávajícího reflektoru a čočky, který vynalezla firma Zumtobel. Přesný název je Zumtobel Reclite Escape. Tato firma byla vybrána na základě preciznosti a komfortního zpracování optických částí, které umožňují teoreticky osvětlit prostředí do šířky až 20 metrů (v závislosti na použité optické části a zvolené závěsné montážní výšce).

5.1. Světelná měření

V samostatném nouzovém svítidle firmy Zumtobel byl vyměněn původní LED světelný zdroj za výkonovou LED diodu vykazující poměrně velký měrný výkon, průměrně 125 lm / W (příkon 1W) a barevnou teplotu 6000 K, vyzařovací úhel 120 °. Originálně osazená LED dioda v reflektoru a čočce měla podstatně vyšší příkon, přibližně 5W a světelný tok 136 lm. Měrný výkon standardního světelného zdroje osazeného v nouzovém svítidle [50]:

$$\eta_P = \frac{\Phi_{ORI}}{P_{ORI}} = \frac{136}{5} = 27,2 \text{ [lm / W]}$$



Obr. 39: Křivka svítivosti původního svítidla osazeného 5 W diodou a kryt prototypu firmy Zumtobel [34]

Jelikož je napájecí záložní zdroj tvořen pouze jedním superkapacitorem, tak by nebyla pro variantu standardně osazené, energeticky náročnější, LED diody výrobcem Zumtobel dodržena normou stanovená minimální doba svícení jedné hodiny pro únikové cesty. Proto bylo nutné stávající zdroj vyměnit zdrojem s lepšími světelně-výkonovými parametry. Teoretická maximální doba svícení s původně osazeným světelným zdrojem a záložním zdrojem superkapacitoru je vyjádřena následujícími rovnicemi:

$$W_{IK} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot 2,7^2 = 10935 \text{ [J]} \quad (5.1.1)$$

$$t_{SVI(S)} = W \frac{\eta_{LDVR}}{P} \text{ [s]} \quad (5.1.2)$$

$$t_{SVI(S)} = 10935 \frac{0,8}{5} = 1749,6 \text{ [s]}$$

$$t_{SVI(M)} = \frac{t_{SVI(S)}}{60} \text{ [min]} \quad (5.1.3)$$

$$t_{SVI(M)} = \frac{1749,6}{60} = 29,16 \cong 30 \text{ [min]}$$

U výše uvedených rovnic není uvažováno s minimálním pracovním napětím měniče. Tento teoretický výpočet simuluje celkové využití naakumulované energie pro vybíjení výkonovou LED diodou s příkonem 5 W.

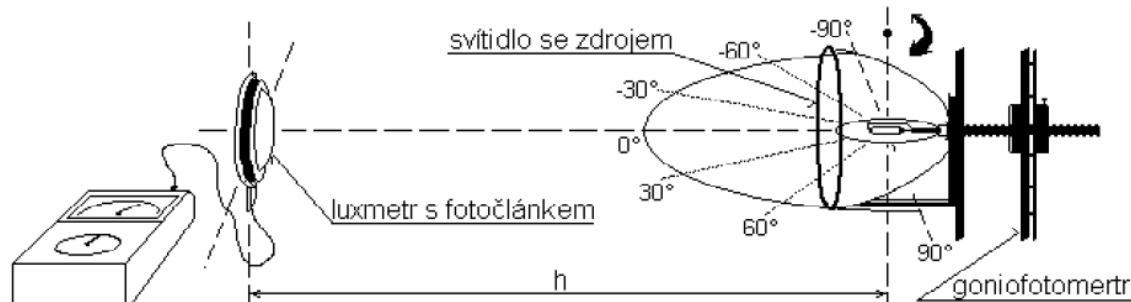
Světelné zdroje ve většině případů samy o sobě nevyhovují pro použití v osvětlovacích soustavách v podobě samotného prvku, protože je jejich světelný tok většinou nevhodně rozdělen do osvětlovaného prostoru. Převážně z tohoto důvodu se světelné zdroje umísťují do svítidel, které obecně zvyšují procento využitelnosti a nasměrování světelného toku do míst, kde je potřebný.



Obr. 40: Úprava optické části svítidla pro měření křivek svítivosti prototypu nouzového svítidla

Čočka nouzového svítidla lomí světelné záření na odrazné plochy, které světlo směřují do požadovaného úzkého pásma specifického pro nouzovou funkci. Funkcí optické čočky, kterou vyvinula firma Zumtobel je také směřování světelného toku přímo na středovou středovou osu osvětlovaného prostranství (chodby), kde musí být podle normy ČSN EN 1838 požadovaná minimální

osvětlenost v rozmezí jednoho metru na úrovni 1 lx. Hraniční oblast středového pásu musí být dle normy také osvětlována minimálně 0,5 lx.



Obr. 41: Způsob měření křivek svítivosti prototypu [33]

Křivka svítivosti byla měřena na automatizovaném goniofotometru v měřicích prostorách Vysoké školy báňské. Konstrukční uspořádání měřicího goniofotometru se skládá z pevně usazené optické části (luxmetr s fotočlánkem) a svítidla se světelným zdrojem, kterým otáčí krokový motor. Hodnoty osvětlenosti byly měřeny v úhlových intervalech s přesností 5° a v prostorových rovinách v intervalech 15°.

		Část měření roviny 0° - 180° [°]														
Úhlový interval [°]	g [°]	Osvětlenost [lx]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	
	0		24	24	25	26	26	26	23	26	26	26	25	24	24	
	5		19	19	19	21	22	23	23	23	23	22	21	19	19	19
	10		16	16	16	16	18	21	24	21	18	16	16	16	16	16
	15		14	14	15	16	16	17	27	17	16	16	16	15	14	14
	20		11	12	13	15	16	16	29	16	16	16	15	13	12	11
	25		10	10	12	14	16	17	32	17	16	16	14	12	10	10
	30		5	7	10	13	15	16	34	16	15	13	10	7	5	5
	35		2	2	5	11	15	16	36	16	15	11	5	2	2	2
	40		2	2	2	9	14	16	40	16	14	9	2	2	2	2
	45		1	2	2	3	14	18	48	18	14	3	2	2	1	1
	50		0	1	2	2	15	20	61	20	15	2	2	1	0	0
	55		0	0	2	2	14	25	83	25	14	2	2	0	0	0
	60		0	0	0	3	9	31	114	31	9	3	0	0	0	0
	65		0	0	0	4	10	44	163	44	10	4	0	0	0	0
	70		0	0	0	3	16	58	193	58	16	3	0	0	0	0
	75		0	0	0	0	23	55	90	55	23	0	0	0	0	0
	80		0	0	0	0	7	14	26	14	7	0	0	0	0	0
	85		0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0
	90		0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	95		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	180		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 9: Ukázka měření osvětlenosti prototypu nouzového svítidla

Fotometrická vzdálenost mezi optickou částí měřeného svítidla a fotometrem byla při měření stanovena na 2,9 m. Pomocí této vzdálenosti je vypočtena ze čtvercového zákona svítivosti v daném vyzařovacím úhlu prototypu svítidla. Pro ukázkou je výpočtem dokázána hodnota svítivosti měřené roviny 0° a v úhlovém intervalu 0 a 5. Ze základní rovnice pro výpočet svítivosti bude vycházet výpočet pro každou část měřené roviny v úhlových intervalech [50]:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \text{ [cd]} \quad (5.1.1)$$

Z rovnice pro výpočet osvětlenosti je potřebné odvodit světelný tok [50]:

$$\Phi = E \cdot A \text{ [lm]} \quad (5.1.2)$$

Vypočtený světelný tok je dosazen do rovnice pro výpočet svítivosti a pomocí něj jsou vypočteny hodnoty svítivosti pro každou měřenou rovinu a úhlový interval:

$$I = \frac{E \cdot A}{\Omega} \text{ [cd]} \quad (5.1.3)$$

Ukázka výpočtu je provedena pro měřenou rovinu v 0°:

$$I_{0^\circ,0^\circ} = E_{0^\circ,0^\circ} \cdot A_{FOT} = 24 \cdot 2,9^2 = 201,81 \cong 202 \text{ [cd]}$$

$$I_{0^\circ,5^\circ} = E_{0^\circ,5^\circ} \cdot A_{FOT} = 19 \cdot 2,9^2 = 159,79 \cong 160 \text{ [cd]}$$

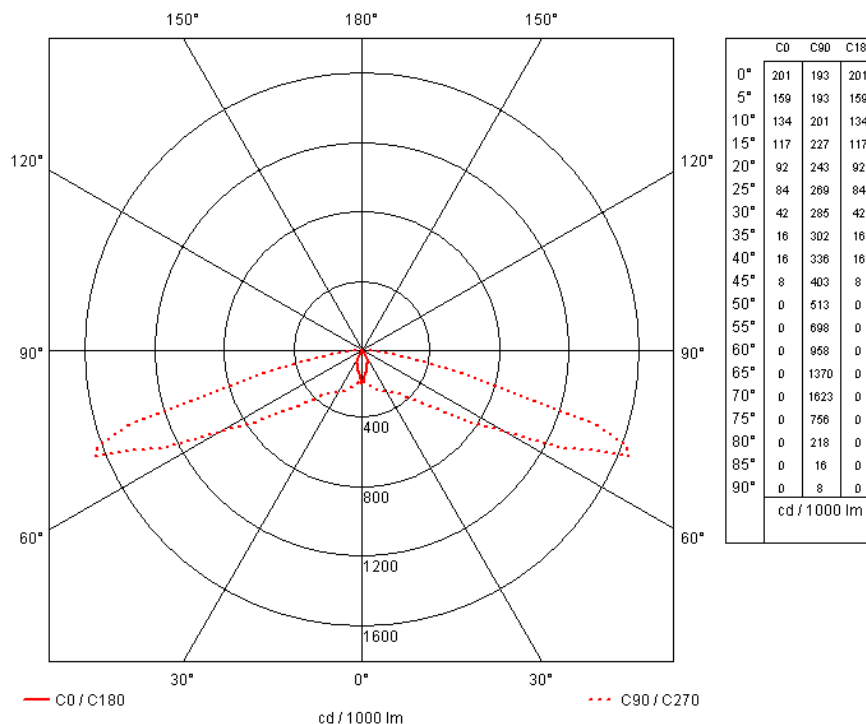
		Část měřené roviny 0 – 180° [°]													
Úhlový interval [°]	g [°]	Svítivost [cd]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	0		201,8	201,8	210,3	218,7	218,7	218,7	193,4	218,7	218,7	218,7	210,3	201,8	201,8
	5		159,8	159,8	159,8	176,6	185	193,4	193,4	193,4	185	176,6	159,8	159,8	159,8
	10		134,6	134,6	134,6	134,6	151,4	176,6	201,8	176,6	151,4	134,6	134,6	134,6	134,6
	15		117,7	117,7	126,2	134,6	134,6	143	227,1	143	134,6	134,6	126,2	117,7	117,7
	20		92,5	100,9	109,3	126,2	134,6	134,6	243,9	134,6	134,6	126,2	109,3	100,9	92,5
	25		84,1	84,1	100,9	117,7	134,6	143	269,1	143	134,6	117,7	100,9	84,1	84,1
	30		42,1	58,9	84,1	109,3	126,2	134,6	285,9	134,6	126,2	109,3	84,1	58,9	42,1
	35		16,8	16,8	42,1	92,5	126,2	134,6	302,8	134,6	126,2	92,5	42,1	16,8	16,8
	40		16,8	16,8	16,8	75,7	117,7	134,6	336,4	134,6	117,7	75,7	16,8	16,8	16,8
	45		8,4	16,8	16,8	25,2	117,7	151,4	403,7	151,4	117,7	25,2	16,8	16,8	8,4
	50		0	8,4	16,8	16,8	126,2	168,2	513	168,2	126,2	16,8	16,8	8,4	0
	55		0	0	16,8	16,8	117,7	210,3	698	210,3	117,7	16,8	16,8	0	0
	60		0	0	0	25,2	75,7	260,7	958,7	260,7	75,7	25,2	0	0	0
	65		0	0	0	33,6	84,1	370	1370,8	370	84,1	33,6	0	0	0
	70		0	0	0	25,2	134,6	487,8	1623,1	487,8	134,6	25,2	0	0	0
	75		0	0	0	0	193,4	462,6	756,9	462,6	193,4	0	0	0	0
	80		0	0	0	0	58,9	117,7	218,7	117,7	58,9	0	0	0	0
	85		0	0	0	0	8,4	8,4	16,8	8,4	8,4	0	0	0	0
	90		0	0	0	0	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	0	0	0	0
	95		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	180		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 10: Ukázka výpočtu svítivosti prototypu nouzového svítidla

Konstrukce goniofotometru při měření nebyla dostatečně tuhá. Během rotace docházelo ke kývání nosných částí optického prototypu svítidla, proto bylo nutné v průběhu měření počítat s přídatnými chybami měření.

Pro výpočet osvětlení v osvětlovaném nouzovém prostředí prostřednictvím software Relux Suite bylo nutné tabulku s hodnotami svítivosti v úhlech implementovat do souboru s příponou .ldt. Na základě upraveného souboru byla vykreslena křivka svítivosti v polárních souřadnicích:



Obr. 42: Křivka svítivosti prototypu nouzového svítidla

Výstupem z měření je množina hodnot svítivosti každé roviny a jí přiřazených úhlových intervalů. Jelikož je optická část prototypu nouzového svítidla souosá, stačilo měřit hodnoty svítivosti pouze v jedné polorovině.

Podle zadaných množin hodnot svítivosti byla vypočítána algoritmem softwaru Relux Suite účinnost prototypu nouzového svítidla na 73 % při jmenovitém světelném toku 125 lm. Jeho vypočítaný měrný výkon byl 93 lm / W. Rozdíl mezi měrným výkonem udávaným v datasheetu výrobce výkonové LED diody a vypočítaným je 32 lm / W. [33], [34]

5.2. Elektrická měření

Po úspěšné projekci a výrobě plošného spoje, na kterém je implementován nabíjecí, napájecí a indikační obvod, přichází na řadu testování a měření elementárních částí. Měřené elektrické veličiny byly snímány pomocí senzorů a následně zpracovávány pomocí software LabVIEW a PC. K vyhodnocení naměřených dat bylo využíváno programu Microsoft Excel 07. Ve všech testech bylo měřeno napětí a proud. Opakované měření vybíjecích a nabíjecích procesů ukázalo, že obvody jsou stabilní a nevznikají žádné parazitní jevy.

Nejdůležitější veličinou, ovlivňující vhodnost prototypu pro použití nouzového svítidla různých druhů prostředí, je užitná doba svícení a maximální dobíjecí doba:

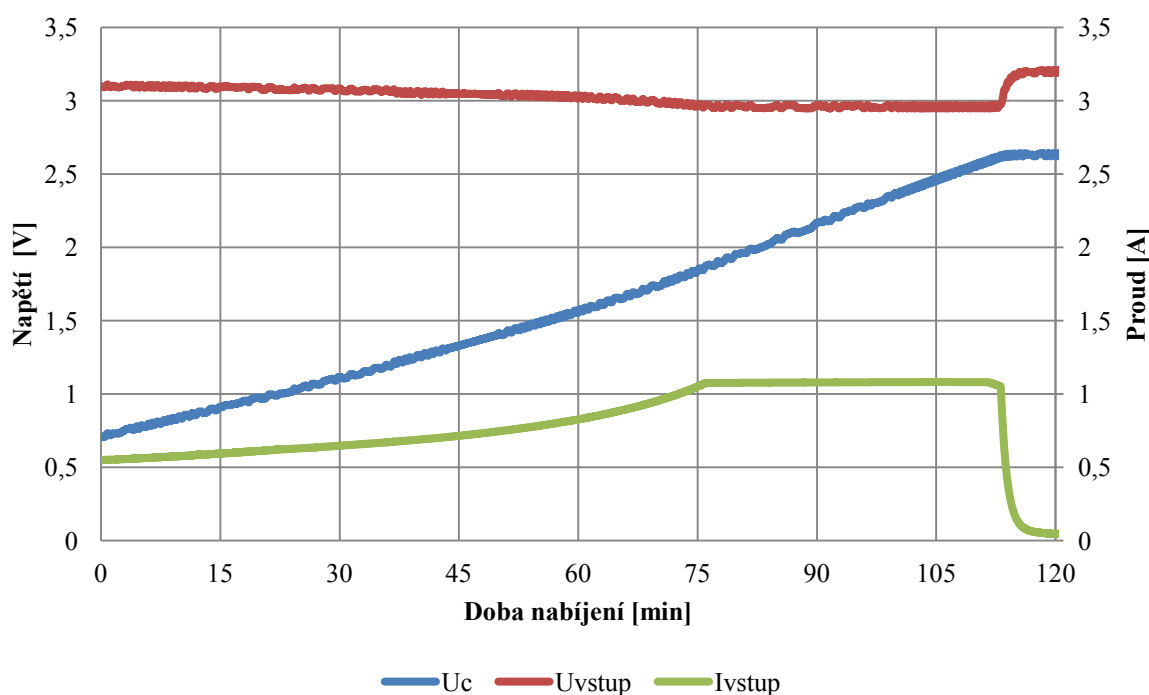
- nabíjecí doba superkapacitoru (ta je normou limitována maximálním nabíjecím časem do 24 hodin)
- vybíjecí doba superkapacitoru (naakumulovaná elektrická energie v superkapacitoru musí dodávat napájecí napětí minimálně 1 hodinu pro osvětlení únikových cest)

5.2.1. Měření nabíjecích veličin

Při měření nabíjecího obvodu v době chodu byly zaznamenávány přibližně lineárně vzrůstající hodnoty napětí na superkapacitoru. Podle vhodně zvolených pasivních součástek (napětového děliče) ovlivňujících velikost maximálního nabíjecího napětí byla hodnota ustálena na 2,65 V. I když není superkapacitor nabit na maximální provozní napětí (2,7 V), tak v něm naakumulovaná elektrická energie bohatě dostačuje pro distribuci požadovaného napětí a proudu LED driveru, který je řízený konstantním proudem a napájí výkonovou LED diodu 350 mA. Superkapacitor nebude v žádném provozním případě nabíjen od svého nulového napětí, protože LED driver z něj odebírá elektrickou energii maximálně při 0,9 V. Tato skutečnost má vliv na maximální využitelné množství elektrické energie.

Z níže uvedeného grafu zobrazujícího nabíjení je patrné, že primární napětí na vstupu inteligentní nabíječky kleslo vlivem zátěže připojené na výstupní nabíjecí piny. Z původní hodnoty primárního napětí 3,3 V kleslo na 3,05 V. Po vypnutí nabíjecího režimu (automatického odpojení superkapacitoru od napětí) je hodnota vstupního napětí okamžitě zvýšena na jmenovitou hodnotu 3,3 V. Praktická doba nabití superkapacitoru z hodnoty napětí 0,65 V na 2,65 V za přibližně 113 minut.

Hodnota nabíjecího proudu je do 75. minuty exponenciálního charakteru a poté je ustálena na naprogramované hodnotě přibližně jednoho ampéru. Nabíjecí proud je nastaven pomocí externího rezistoru na hodnotu jednoho ampéru. Inteligentní nabíječka dovoluje nabíjet zdroje elektrické energie až 2 ampéry. Při těchto hodnotách vznikají 4x větší Jouleovy ztráty a nabíječka LTC4425 při překročení určité teploty (okolo 160 °C) vypíná svou funkci. Proto bylo důležité experimentálně zvolit hodnotu nabíjecího proudu s ohledem na nabíjecí dobu a také na vlastní oteplení integrovaného obvodu. Prvotní exponenciální křivku nabíjecího proudu lze odůvodnit rozdílem nabíjecího napětí a napětí na superkapacitoru. Při menším rozdílu je hodnota nabíjecího proudu stabilizována až maximálního nabití.



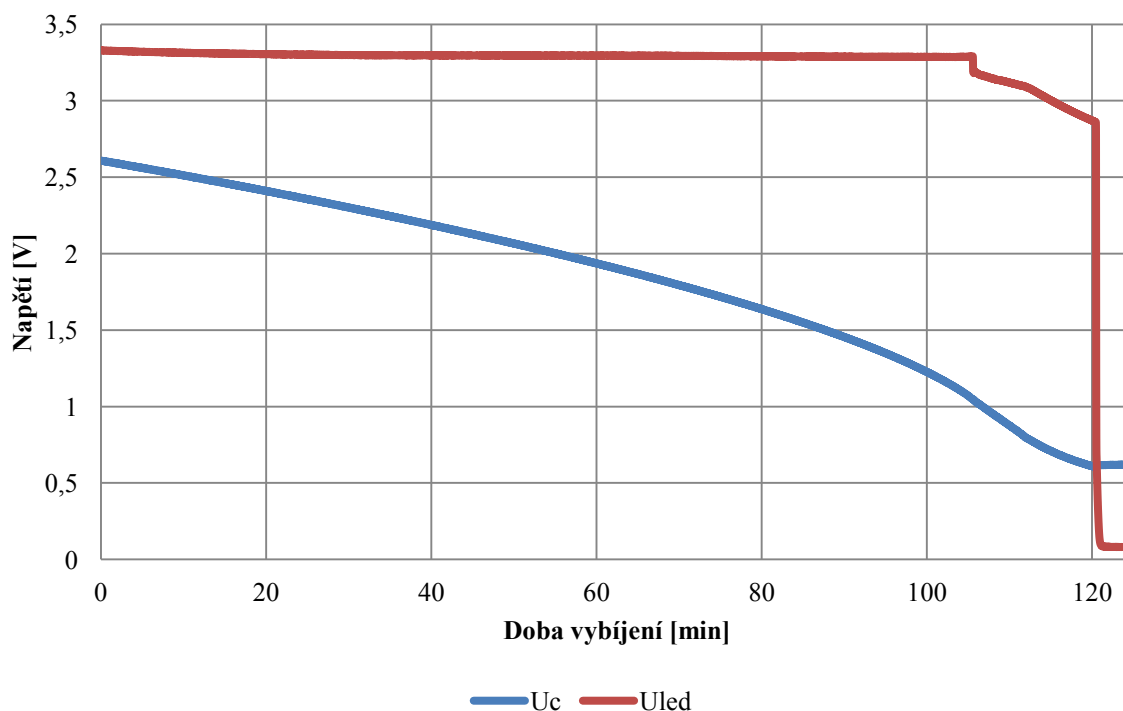
Obr. 43: Reálné nabíjení superkapacitoru inteligentní nabíječkou

5.2.2. Měření vybíjecích veličin

Při měření napájení výkonové LED diody elektrickou energií naakumulovanou v superkapacitoru byly zaznamenávány velikosti hodnot napětí na LED diodě a superkapacitoru. Vzhledem k vznikajícím úbytkům napětí na měřicích bočnicích a kabeláži a kontaktech nebyly měřeny velikosti proudů na LED diodě a superkapacitoru. Úbytek napětí se negativně podílí na krácení doby svícení, protože jeho hodnota je transponována na minimální pracovní napětí měniče. V testovacím a provozním režimu ovšem není ohrožena úbytkem napětí požadovaná doba svícení jedné hodiny pro osvětlení únikových cest, ale hlavním cílem bylo pochopitelně zjištění maximální možné doby svícení prototypu nouzového svítidla.

Podle očekávání je vybíjecí charakteristika superkapacitoru exponenciální funkce. Z maximální hodnoty napětí na superkapacitoru 2,65 V během 120 minut pokleslo na 0,65 V. Přibližně po 120 minutách LED driver vypne svou napájecí funkci. Od 105. minuty je z níže uvedeného grafu patrné, že křivka napětí na výkonové LED diodě strmě klesá ze jmenovité hodnoty 3,4 V. Během strmě klesajícího průběhu napětí na LED diodě je také strmě snižován světelný tok svítidla. Posledních 15 minut aktivní doby svícení prototypu vyzařovaný světelný tok výkonové diody neosvětlí požadovanou plochu kolem středové osy v prostoru a také mohou vznikat velké rozdíly mezi maximální a minimální osvětleností v prostoru, která je udávána podle normy v poměru 1:40. Pro aplikaci prototypu je důležité udržovat konstantní světelný tok zdroje v čase 0 až 60 minut, který je deklarován normou ČSN EN 1838, a to experimentální měření potvrdilo.

Opakované měření vybíjecích veličin také mj. potvrdilo, že LED driver nevypnul při mezním minimálním napětí 0,9 V, ale přibližně okolo 0,65 V. Proto byla prodloužena doba svícení o devět minut.



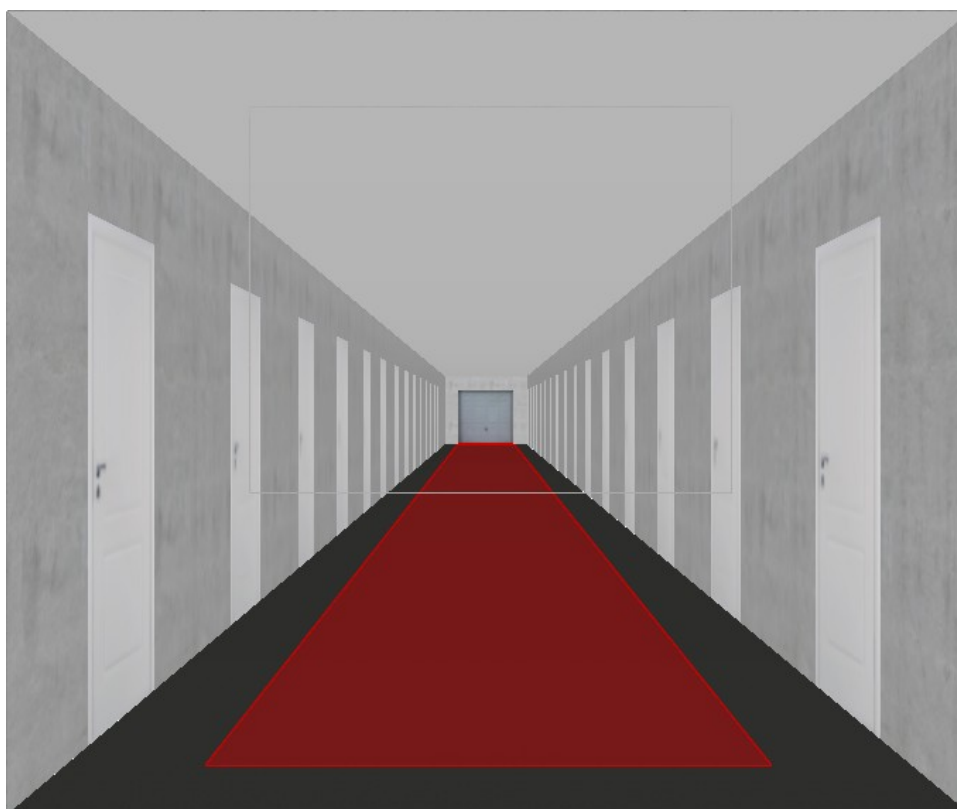
Obr. 44: Reálné vybíjení superkapacitoru 1W výkonovou LED diodou

5.3. Návrh nouzové osvětlovací soustavy s prototypem nouzového svítidla

5.3.1. Projektování prototypu nouzového osvětlení v chodbě na kolejích VŠB – TU Ostrava

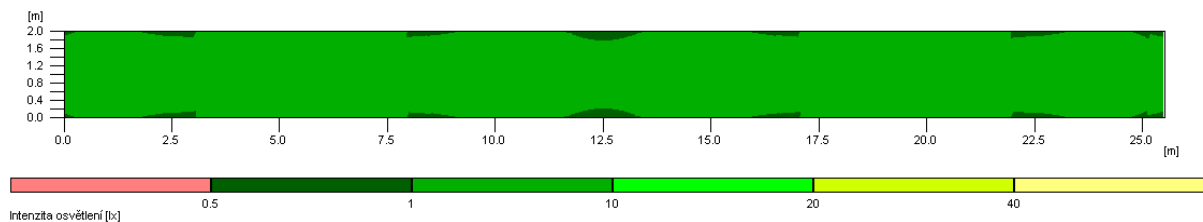
Osvětlovaná chodba se nachází v budově kolejí Vysoké školy Báňské v Ostravě. Podle měření byl vyhodnocen rozměr uvažované nouzově osvětlované chodby, přesněji je 26 m dlouhá a 3 m široká. V chodbě je situováno 20 dveří, které jsou určeny k vstupu do obytných pokojů na kolejích. Jejich rozměry jsou 90 x 200 cm. Dále je prostor chodby vybaven únikovými dveřmi, které jsou široké a vysoké 2 m. Prototyp nouzového svítidla je umístěn v závěsné výšce 3 m nad podlahou. Minimální výška udávaná normou, ve které musí být nouzové svítidlo umístěno, je 2 m nad úrovní podlahy.

Prototyp nouzového svítidla s příkonem 1 W a světelným tokem 90,35 lm (účinnost optické části prototypu je 73 %) musí dostatečně osvětlit při nouzovém režimu středovou horizontální osu v minimální intenzitě 1 luxu a postranní pás srovnávací roviny v minimální výši 0,5 lx. Při výpočtových metodách systému nouzového osvětlení není uvažováno s podílem nepřímé složky světelné energie. Ve vývojovém prostředí Relux Suite byl vytvořen návrh zakládající se na reálných proporcích.



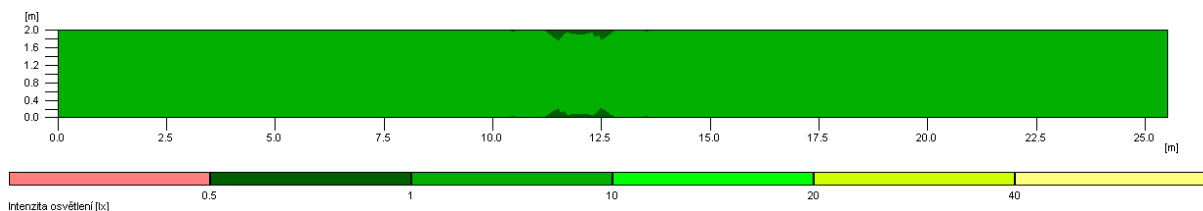
Obr. 45: 3D projekce chodby v prostorech kolejí VŠB

Virtuální srovnávací rovina je v chodbě umístěna ve vzdálenosti 2 cm od podlahy dle normy. Intenzita osvětlení je měřena funkcí, jež byla ve výpočtovém programu Relux Suite nastavena pomocí módu únikové cesty. Aby byla dodržena požadovaná intenzita osvětlení středové osy únikové cesty v minimální výši jednoho luxu a poměru maximální a minimální osvětlenosti v poměru 1:40, je potřebné instalovat na strop dva prototypy nouzového svítidla v závěsné výšce 3 m v maximální vzdálenosti 13,3 metru.



Obr. 46: Požadovaná intenzita osvětlení 1 lx v maximální vzdálenosti dvou prototypů

Pro zjištění rozdílu osvětlovaných ploch prototypu a původního nezměněného svítidla bylo nutné v software Relux Suite namodelovat totožnou situaci pomocí původního nouzového svítidla firmy Zumtobel, které má vyšší vyzařovaný světelný tok. S uvažováním původních svítidel Zumtobelu byla vypočtena maximální osvětlovaná vzdálenost na úrovni 1 lx 16,4 metrů.



Obr. 47: Požadovaná intenzita osvětlení 1 lx v maximální vzdálenosti dvou nouzových svítidel Zumtobel

Rozdíl osvětlované délky v závěsné výšce 3 metrů mezi prototypem a původním svítidlem je simulací v Relux Suite stanoven přibližně na 3,1 metrů. Důležité je také optickou část prototypu instalovat tak, aby normála křivky svítivosti vedla vodorovně se středovou osou únikové cesty.

Povrch a odrazivost prostoru chodby nebyl studován a rozebírán, protože se při světelných výpočtech nouzového osvětlení neuvažuje s podílem odražených a nepřímých složek. Je také nutné brát v úvahu, že pro správné rozpoznání bezpečnostních značek a podružných informací je vyžadován index podání barev minimálně $R_A 40$.

S limitními hodnotami oslnění není pro tento případ nouzového osvětlení prototypem uvažováno, neboť se nejedná o protipanické a nouzové osvětlení prostorů s vysokým rizikem.

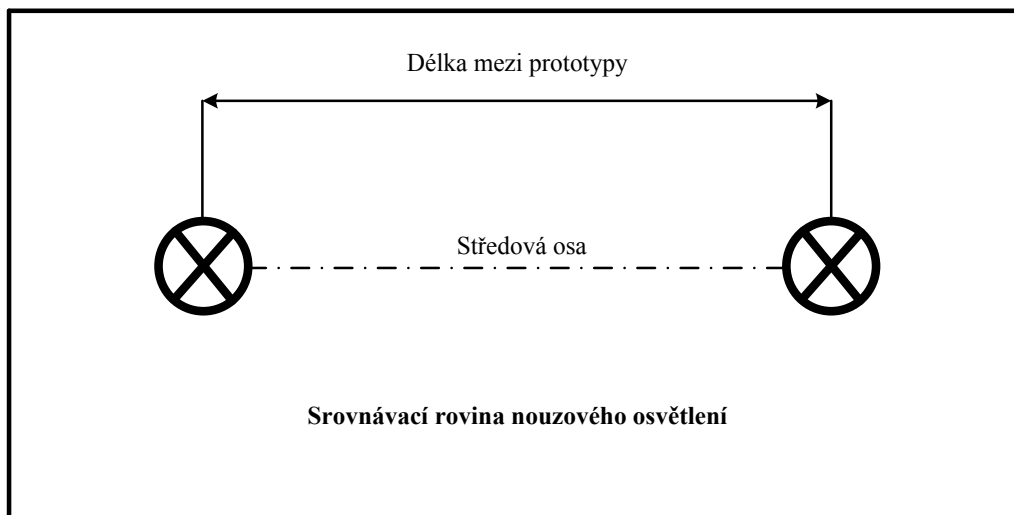
V následujících kapitolách bude experimentální simulací vypočítána závislost vzdálenosti dvou prototypů svítidel různých světelných toků a osvětlovaných ploch na závěsné výšce, poměru maximální a minimální osvětlenosti a požadované intenzity osvětlení 1 lx.

5.3.2. Maximální vzdálenost mezi prototypy s uvažovanou osvětleností v poměru 1:40

Hlavním požadavkem simulace minimální a maximální hodnoty osvětlenosti na středové ose srovnávací roviny je zjištění maximální vzdálenosti mezi dvěma prototypy nouzového svítidla. Přitom není uvažována normou daná, minimální hodnota osvětlení středové osy 1 lx. Minimální a maximální hodnota musí být nejvýše v poměru 1:40 (0,25). Maximální vzdálenosti v normou daném poměru mezi dvěma uvažovanými prototypy byly simulovány pro tři úrovně závěsné výšky nad virtuální srovnávací rovinou:

- 2,5 m
- 3 m
- 3,5 m

Pro tyto úrovně závěsné výšky byly simulací v software Relux Suite zvyšovány velikosti světelného toku zdroje od původní hodnoty výkonové diody použité v prototypu 125 lm až do 225 lm, který bude podle prognóz světových distributorů výkonových diod technologicky možný na konci tohoto desetiletí.



Obr. 48: Virtuální schéma na měření maximální vzdálenosti

Maximální délky osvětlenosti středové osy v poměru 1:40 mezi dvěma prototypy:

- 2,5 m 21,5 m
- 3 m 26,5 m
- 3,5 m 31,5 m

Při závěsné výšce 2,5 metrů prototypu nad srovnávací rovinou je potřebný pro maximální osvětlovanou vzdálenost 21,5 metrů v poměru 1:40 zvýšit světelný tok výkonové diody alespoň na hodnotu 1185 lm, kterou udává níže uvedený vzorec:

$$\Phi_{MAX_1:40} = \frac{E_{POŽ}}{E_{VYP}} \cdot \Phi_{225} \quad (5.3.2.1)$$

$$\Phi_{MAX_1:40,2,5} = \frac{E_{POŽ}}{E_{VYP}} \cdot \Phi_{225} = \frac{1}{0,19} \cdot 225 = 1185 \text{ [lm]}$$

Při závěsné výšce 3 metrů prototypu nad srovnávací rovinou je potřebný pro maximální osvětlovanou vzdálenost 26,5 metrů v poměru 1:40 zvýšit světelný tok výkonové diody alespoň na hodnotu 1731 lm, kterou udává níže uvedený vzorec:

$$\Phi_{MAX_1:40,3} = \frac{E_{POŽ}}{E_{VYP}} \cdot \Phi_{225} = \frac{1}{0,13} \cdot 225 = 1731 \text{ [lm]}$$

Při závěsné výšce 3,5 metrů prototypu nad srovnávací rovinou je potřebný pro maximální osvětlovanou vzdálenost 31,5 metrů v poměru 1:40 zvýšit světelný tok výkonové diody alespoň na hodnotu 2250 lm, kterou udává níže uvedený vzorec:

$$\Phi_{MAX_1:40,3,5} = \frac{E_{POŽ}}{E_{VYP}} \cdot \Phi_{225} = \frac{1}{0,1} \cdot 225 = 2250 \text{ [lm]}$$

h	2,5 m		3 m		3,5 m	
Φ	E _{min}	E _{max}	E _{min}	E _{max}	E _{min}	E _{max}
[lm]	[lx]		[lx]		[lx]	
125	0,1	4,08	0,07	2,84	0,05	2,1
135	0,11	4,4	0,08	3,07	0,06	2,27
145	0,12	4,73	0,08	3,3	0,06	2,36
155	0,13	5,05	0,09	3,53	0,07	2,6
165	0,14	5,38	0,1	3,75	0,07	2,77
175	0,15	5,71	0,1	3,95	0,07	2,94
185	0,15	6,03	0,11	4,17	0,08	3,1
195	0,16	6,36	0,11	4,4	0,08	3,27
205	0,17	6,68	0,12	4,62	0,09	3,44
215	0,18	7,01	0,13	4,85	0,09	3,61
225	0,19	7,34	0,13	5,07	0,1	3,78

Tab. 11: Experimentálně vypočítané hodnoty maximálních a minimálních hodnot osvětlenosti

Tento experiment byl proveden za účelem maximální možné vzdálenosti, kterou mezi sebou prototypy nouzového svítidla dokážou osvětlit při měrném výkonu 1185, 1731, 2250 lm.

Až na výkonovou diodu s příkonem maximálně 2 W, jejíž odběr by byl teoreticky pokryt naakumulovanou elektrickou energií jednoho superkapacitoru po dobu minimálně 1 hodiny je osazení optické části prototypu LED diodou s vyšším příkonem momentálně neakceptovatelné. Jeden superkapacitor svou naakumulovanou energií nemůže dodávat do např. 3 W LED diody jmenovitý příkon po dobu trvání minimálně 1 hodinu, stanovenou pro osvětlování únikových cest, a to i za cenu toho, že světelný tok 3 W výkonové diody dosahuje podle datasheetu výrobce již v dnešní době 210 lm. Napájení diod většími příkony je proveditelné pouze v případě zdvojení superkapacitorových článků. Tento krok je ovšem finančně náročnější a cena celkového prototypu se dostala za hranici únosnosti.

$$W_{IK} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot 2,7^2 = 10935 \text{ [J]}$$

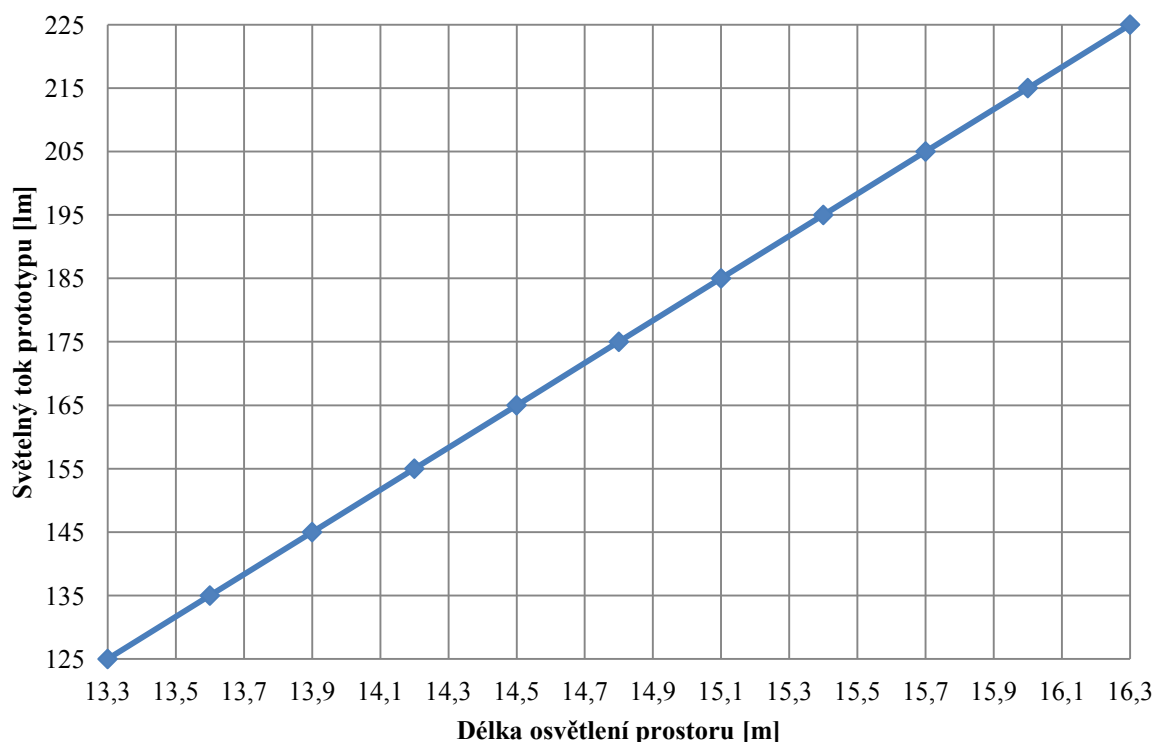
$$k_{SVÍCENÍ} = \frac{W}{P} = \frac{10935}{\frac{3}{0,8}} = 2916 \text{ [s]}$$

$$t_{SVÍCENÍ} = \frac{k_{SVÍCENÍ}}{60} = 29,16 \cong 48,6 \text{ [min]}$$

5.3.3. Osvětlování středové osy prototypem svítidla

Ve výpočtovém software Relux Suite 2010 byl proveden experiment osvětlení středové osy v minimální hodnotě jednoho luxu ze závěsné výšky 3 m mezi dvěma prototypy. Vypočítaná data byla

převedena do software Microsoft Excel 07. Světelný tok prototypu nouzového svítidla byl virtuálně zvyšován o 10 lm při každém výpočtu. Vzdálenost mezi dvěma svítilny se s narůstajícím světelným tokem zvyšovala téměř lineárně a to vždy zhruba o 0,3 metrů.



Obr. 49: Srovnání světelného toku a osvětlené vzdálenosti prototypu

5.4. Porovnání prototypu a konvenčního nouzového osvětlení

Prototyp nouzového osvětlení, který je napájen superkapacitorem, nabízí při svém uvedení do běžné praxe hned několik výhod oproti konvenčnímu řešení. Z výše uvedených kapitol vyplývá, že je v praxi plně použitelný. Největší nevýhoda v použití prototypu je prvotní vysoká finanční investice daná v dnešní době velkou cenou za superkapacitor Maxwell BCAP3000. Ze světelných výpočtů vyplývá skutečnost, že je nutné u prototypu zmenšit rozteče při usazování v osvětlovaném prostoru z důvodu nižší osvětlené plochy. Tento fakt může být změněn prognózou v oblasti stálého zvyšování měrného výkonu LED diod a účinnosti LED driverů.

Testováním, vlastním návrhem a měřením bylo zjištěno, že prototyp může být finančně a běžně praxi výhodný převážně pro osvětlení prostorů a míst:

- kterými vedou únikové cesty
- na kterých je lokalizován protipanický prostor
- která jsou opatřena prostředky pro první pomoc
- na kterých je umístěn požární hlásič
- která jsou vybavena hasicím přístrojem

Srovnání prototypu a konvenčního nouzového svítidla je vhodné z hlediska:

- investičních nákladů

- provozních nákladů

5.4.1. Investiční ekonomický rozpočet jednoho prototypu nouzového svítidla

S odkazem na jednoho z předních světových distributorů elektrotechnických komponentů, jehož webové stránky jsou: www.cz.mouser.com, dodává superkapacitor použitý v prototypu za cenu:

Superkapacitor Maxwell BCAP3000 P270 K04 2596 Kč

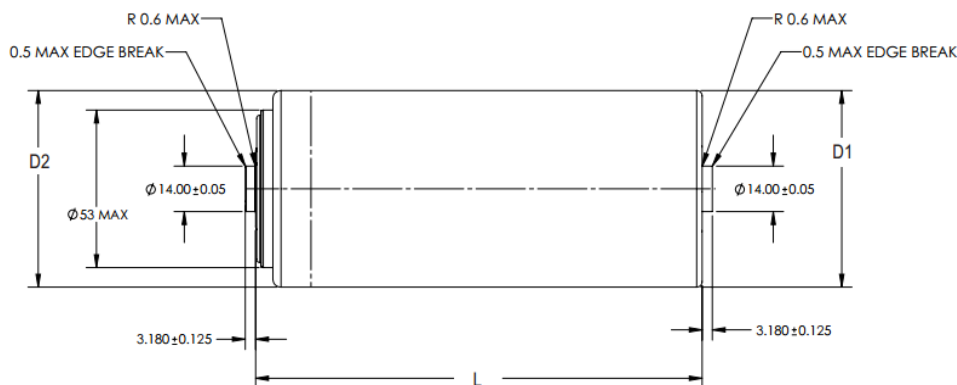
Ostatní komponenty jsou dodávány prostřednictvím webového portálu www.farnell.com, který poskytuje téměř výhradně veškeré elementární části elektronického obvodu (napájecí a nabíjecí):

Inteligentní nabíječka LTC4425	165 Kč
LED driver LTC3490	120 Kč
Výkonová LED dioda 1 W / 125 lm	95 Kč
Pasivní součástky (rezistory, kondenzátory, indukčnost) a kabeláž	100 Kč
Vstupní a výstupní konektory	40 Kč
Výroba plošného spoje	200 Kč
Stabilizovaný stejnosměrný zdroj	142 Kč
Optická část svítidla	200 Kč
Kryt	150 Kč
Celkové hmotné finanční náklady na jeden kus prototypu	3808 Kč
Průměrně odpracovaný čas výrobě jednoho kusu prototypu	5 hodin
Hodinová mzda kvalifikovaného pracovníka	200 Kč
Náklady na výrobu a práci	1000Kč
Celkové náklady pro prototyp nouzového svítidla	4808 Kč

Do celkových investičních nákladů prototypu nouzového svítidla je nutné také započítat náklady za dopravu všech komponentů, marže výrobců a prodejců a firem instalujících prototyp do prostředí, vývoj a příslušnou certifikaci.

Při koupi většího počtu komponentů je cena obvykle snížena. Tímto faktem může výrobce prototypu ušetřit.

Mezi největší nevýhodu prototypu v oblasti instalace do prostoru jsou enormní rozměry a váha superkapacitoru. Oproti běžným konvenčním akumulátorových baterií je tato varianta ve značné nevýhodě v oblasti různorodé montáže. Proto musí být zajištěn prostor, který vyhovuje poměrně větším rozměrům prototypu jako celku. [32], [35]



Obr. 50: Rozměry superkapacitoru Maxwell BCAP3000 [32]

$L = 138 \text{ mm}$	$D1 = 60,4 \text{ mm}$	$D2 = 60,7 \text{ mm}$
----------------------	------------------------	------------------------

5.4.2. Provozní náklady prototypu

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, životnost superkapacitoru je ovlivňována převážně nabíjecím napětím a provozní teplotou. Výrobce superkapacitorů, firma Maxwell zaručuje, že v případě splnění provozních požadavků při práci s ním se jeho kapacita sníží za 12 let průměrně o 20 %. Z tohoto důvodu naopak provozovatel nouzové osvětlovací soustavy ušetří, neboť náklady na provoz, údržbu a výměnu akumulátorových článků z konvenčních systémů tvoří nemalou finanční sumu.

Srovnání může být provedeno na základě povinné výměny zdrojů a teoretické projektované životnosti:

- záložní zdroj prototypu (teoretická výměna po konci života 12 let)
- záložní zdroj konvenčního nouzového svítidla (pravidelná výměna nutná podle normy 4 let)

Výměna akumulátorových baterií ve srovnání s výměnou superkapacitorů je třikrát častější. Nutnost výměny je také spojena s třikrát větší investicí do práce. Jelikož se bude práce za údržbu podle prognózy zvyšovat a kupní cena superkapacitoru stále snižovat má prototyp nouzového svítidla napájeného superkapacitorem velký potenciál. [35]

5.4.3. Porovnání konvenčních nouzových svítidel a prototypu

Na základě čtyř uvedených autonomních systémů nouzových svítidel byly srovnány energetické, světelně-technické a ekonomické parametry jednotlivých druhů svítidel nouzového osvětlení. Nouzová osvětlení byla srovnávána na základě použitého světelného a záložního zdroje. Jedná se o tři svítidla osazená LED světelnými zdroji a jedno svítidlo s lineární zářivkou.

Z níže uvedené tabulky je patrné, že případná finanční částka vynaložená do zakoupení prototypu je v poměru ostatních nouzových svítidel vysoká vzhledem k vyzařovanému světelnému toku. Největší přednost technologie prototypu vychází s méně časté výměny záložního zdroje.

Jeden elektrochemický záložní zdroj podle nejnovějšího průzkumu trhu stojí v průměru 750 Kč [52]. Příslušná norma ČSN EN 1838 stanovuje výměnu elektrochemických zdrojů v intervalu 4 roky.

V průměru dosahuje celková suma za výměnu baterií 2250 Kč. Životnost superkapacitoru udávaná výrobcem Maxwell splňuje výměnu jednoho kusu za 12 let s poklesem vlastní pracovní kapacity maximálně 20 %, proto není do pravidelné výměny uvažována.

		Prototyp	Zumbote Reslite	Fenix	Diana 8
Typ světelného zdroje		LED	LED	LED	Lineární zářivka
Příkon světelného zdroje	[W]	1	5	8	8
Světelný tok svítidla	[lm]	95	135	55	155
Stupeň krytí (IP)		40	40	65	42
Doba svícení	[min]	115	60	180	60
Typ záložního zdroje		SuperCAP	NiMH	NiCd	NiCd
Cena	[Kč]		5000	834	5334
Odhadovaná cena*	[Kč]	4808			

Tab. 12: Finanční a světelně-technické srovnání autonomního nouzového osvětlení [37], [52]

Původní nouzové svítidlo Zumtobel je osazeno elektrochemickým zdrojem NiMH s kapacitou 2 Ah. Tato kapacita je dimenzována na dodávání do 5 W světelného zdroje elektrickou energií v minimální době svícení jedné hodiny. Světelný zdroj nouzového svítidla Fenix je tvořen 18 LED diodami s celkovým příkonem 8 W. V případě nouzového svítidla Diana 8 je použita lineární zářivka s příkonem 8 W.

V současné době se jeví varianta prototypu nouzového svítidla jako finančně nejdražší. Postupným snižováním cen elementárních částí nemusí být tento charakter významný s přihlédnutím k výměně záložního zdroje (superkapacitor) jednou za 12 let. [35]

6 Závěr

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací záložního zdroje nouzového osvětlení řešeného novými progresivními technologiemi v oblasti akumulace elektrické energie – superkapacitorem.

V této souvislosti je v prototypu zahrnuta inovativní technologie v oblasti osvětlovacích soustav – výkonová LED dioda, s jejíž funkcí vyzařovací schopnosti se do budoucna počítá s neustálým pokrokem v oblasti efektivitu využití elektrické energie (zvyšování světelného toku na úkor stagnace nebo dokonce snižování elektrického příkonu).

V závislosti na požadované době svícení prototypu byla teoreticky vypočtena potřebná kapacita pro akumulaci elektrické energie ve formě elektrického náboje velikosti 2352 F, ve kterém je započítán i koeficient opotřebení v průběhu 10 let. Prostřednictvím tohoto výpočtu byla ověřena vhodnost použití superkapacitoru pro napájení prototypu nouzového osvětlení bez častějších výměn záložních zdrojů, jako je tomu u nouzových svítidel napájených akumulátorovými články.

Na základě vypočítané velikosti kapacity dostačující pro napájení prototypu nouzového osvětlení byl zvolen superkapacitor Maxwell BCAP3000 s kapacitou 3000F. Pomocí zvolené kapacity byl v programovacím prostředí Microsoft Excel 07 vytvořen proces simulace vybíjení superkapacitoru prostřednictvím výkonové LED diody, kde byla ověřena požadovaná doba svícení prototypu na jednu hodinu pro účely nouzového osvětlení únikových cest. Pro zvolený světelný zdroj v prototypu (výkonová LED dioda) s příkonem 1 W a světelného toku 125 lm byl zvolen pouze jeden superkapacitorový článek. Podle zrealizovaných simulací dokáže jeden superkapacitorový článek dodávat světelnému zdroji prototypu požadovaný příkon dokonce 126 minut při minimálním pracovním napětí měniče. V této simulaci nejsou uvažovány žádné přídavné ztráty, a proto je nutné simulaci brát pouze jako čistě informativní. Sestavený záložní zdroj pro napájení výkonové LED diody větších příkonů je uvažován pouze s větším počtem superkapacitorů zapojených v sérii nebo paralelně. Každý z možných druhů zapojení je charakteristický rozdílnou velikostí napětí a kapacity.

Vlastní návrh elektronické části prototypu nouzového svítidla je složen z nabíjecího a napájecího a indikačního obvodu. Nabíjecí obvod je regulován a řízen integrovaným obvodem LTC4425, který pomocí externích pasivních součástek nabíjí superkapacitor do požadované hodnoty napětí 2,7 V a maximální doby, která je deklarována normou na 24 hodin. Napájecí obvod je tvořen také integrovaným obvodem od firmy Linear Technology LTC3490. Obecně je tento LED driver (DC/DC konvektor) napájen stále se snižujícím napětím ze superkapacitoru. Úkolem je napájet výkonovou LED diodu konstantním proudem o hodnotě 350 mA. LED driver je říditelný na výstupu konstantním proudem, protože použité výkonové LED diody nemůže kolísat se změnou amplitudy proudu světelný tok. Kdyby byla LED dioda řízena na V-A charakteristice napětím, tak by hodnota světelného toku fluktovala vlivem zahřívání PN přechodu. Indikace provozních stavů je navržena pomocí tranzistorové logiky. Pomocí dvouúrovňového napěťového pinu na integrovaném obvodu LTC4425 je indikován stav nabíjení superkapacitoru. Tato indikace je vyobrazena červenou barvou. Indikace napájecího napětí na síti je vyřešena pomocí zelené signalizační LED diody.

Dimenzování plošného spoje zprostředkující všechny výše uvedené obvody bylo řešeno v souladu s rozměry pracovního superkapacitoru, který zároveň slouží jako pasivní chladič, protože jeho vnější povrch je vyroben z teplovodivé slitiny hliníku. Aspekty ohledně chlazení jsou důležité

převážně pro integrované obvody obsažené na plošném spoji, protože obecně čím je vyšší teplota, tím je nižší účinnosti a efektivita celého systému.

Testováním indukčností v napájecím obvodu byla sledována stabilita napájecího obvodu a dodržení doporučené doby svícení v minimální výši 1 hodiny pro osvětlování únikových cest. Podrobný průběh testování všech veličin je zaznamenán v přílohách této diplomové práce. Ze tří indukčností 3, 3 μH o různých vnitřních rezistivitách 3,3 a 6,6 a 8,8 $\text{m}\Omega$ byla prostřednictvím měření napětí na superkapacitoru a LED diodě vybrána indukčnost s vnitřní rezistivitou 6,6 $\text{m}\Omega$ na základě nejvyšší hodnoty napětí na LED diodě a superkapacitoru. Hodnoty napětí byly zaznamenávány do 114 minut, napětí na superkapacitoru bylo 1,125 V a výkonové LED diodě 3,243 V se zapojenou 6,6 $\text{m}\Omega$ indukčností.

Hodnocení prototypu nouzového osvětlení bylo prováděno podle světelných a elektrických měření. Prostřednictvím světelných měření byla měřena křivka svítivosti v rovinách C- γ . Křivka svítivosti prototypu nouzového svítidla téměř totožná s křivkou svítivosti původního (originálního) svítidla. Tento fakt dokazuje, že tvar křivky většinou ovlivňuje pouze optická část svítidla (reflektor, čočka). Na plně automatizovaném goniofotometru byly měřeny hodnoty osvětlenosti v měřených rovinách a jim přiřazeným měřeným úhlům. Podrobná tabulka měření je přiložena v příloze. Vzdálenost luxmetru od prototypu byla naměřena na 2,9 m. Pomocí této vzdálenosti byla vypočítána ze čtvercového zákona hodnota svítivosti v každém měřeném bodě. Hodnoty svítivosti byly posléze zpracovány a upraveny pro soubor s příponou .ldt. S takto upraveným souborem byl vytvořen návrh a experimentální měření vzdáleností, minimálních a maximálních osvětleností v software Relux Suite.

Prostřednictvím elektrického měření byly vyhodnoceny a zpracovány veličiny proudu, napětí a času. Z grafů v přílohách zobrazující nabíjecí a vybíjecí pochody je patrné, že je superkapacitor nabit z původní hodnoty 0,65 V na 2,65 V za přibližně 113 minut. Tímto časem je splněna normovaná doba pro nabití jakéhokoliv záložního zdroje pro systémy nouzového osvětlení, který je limitován 24 hodinami. Při měření vybíjecích charakteristik bylo měřeno napětí na superkapacitoru a výkonové LED diodě. Z hlediska požadované doby svícení pro osvětlení únikových cest je nutné dostatečně osvětlit prostor alespoň na jednu hodinu od vzniku nouzového stavu. Měření a testy potvrdily, že prototyp nouzového svítidla svítí přibližně dvě hodiny. Vybíjení superkapacitoru umístěného v prototypu bylo opakováno, aby byl eliminován vznik nestability a oscilací integrovaných obvodů. Opakované měření také potvrdilo, že LED driver nevypíná svou funkci již při 0,9 V, ale 0,65 V. Z toho faktu plyne skutečnost, že je ze superkapacitoru využito o 10% více energie, která představuje zhruba téměř 15 minut navíc v dodávání elektrické energie výkonové LED diodě.

Při návrhu prototypu nouzového svítidla byla experimentálně sledována nejdelší vzdálenost mezi dvěma prototypy nouzového osvětlení. Návrh spočíval v instalaci prototypu v závěsné výšce 3 metrů nad virtuální srovnávací rovinou. Poměr maximální a minimální osvětlenosti musel být v poměru 1:40 a minimální osvětlenost na středové ose ve velikosti 1 lx a postranní pásmo kolem středové osy (1 m) v hodnotě alespoň 0,5 lx. V této závěsné výšce byla vypočtena pomocí software Relux Suite maximální vzdálenost mezi dvěma prototypy svítidel na 13,3 m. Pro srovnání s originálním svítidlem firmy Zumtobel, jejichž dvě nouzová svítidla osvětlí mezi sebou plochu ve vzdálenosti 16,4 metrů ze stejné závěsné výšky 3 metrů. Rozdíl mezi prototypem a původním svítidlem je 3,1 metrů. Tento rozdíl je dán menším vyzařovaným světelným tokem v prototypu nouzového svítidla, menší účinností a také nepatrnou změnou křivkou svítivosti. V neposlední řadě je také důležité zmínit, že plně automatizovaný goniofotometr se při vlastním měření křivek svítivosti

kýval, proto budou tímto zkreslené i výstupní data. Následující experiment byl založen na osvětlení středové osy v poměru 1:40 s co největší vzdáleností, kdy nebyla v podmínce minimální osvětlenost 1 lx. Pro závěsnou výšku 2,5 m byla maximální vzdálenost 21,5 metrů. Pro závěsnou výšku 3 m byla maximální vzdálenost v poměru 1:40 26,5m a pro závěsnou výšku 3,5 metrů byla maximální vzdálenost 31,5 metrů. Aby byla dostatečně osvětlena vzdálenost 21,5 metrů středové osy mezi dvěma prototypy v minimální úrovni 1 lx, je potřeba vyvinout světelným zdrojem v prototypu světelný tok 1185 lm. Pro osvětlovanou vzdálenost 26,5 metrů ze závěsné výšky 3 m je nutný světelný tok minimálně 1731 lm a vzdálenost 31,5 metrů ze závěsné výšky 3,5 metrů je požadován světelný tok zdroje 2250 lm. S virtuálním zvyšováním světelného toku dvou prototypů o 10 lm se zvětšovala osvětlená vzdálenost středové osy průměrně o 30 cm. Tyto experimenty byly prováděny pomocí výpočtového software Relux Suite.

Podle experimentálního testování se prototyp hodí zejména pro osvětlení únikových cest, pro osvětlení protipanického prostoru, míst s požárními hlásiči, první pomocí a hasicími přístroji. Porovnání prototypu nouzového osvětlení a autonomních systémů jsou rozebrány v souladu s investičními a provozními náklady. Největší finanční položkou v prototypu nouzového svítidla je vlastní superkapacitor, jehož cena se momentálně pohybuje okolo 2596 Kč. Další část je vynaložena do napájecích, nabíjecích a indikačních obvodů, která se pohybuje okolo 1212 Kč. Poslední finanční položka je vymezena pro výrobu a práci strávenou na výrobě prototypu, jejíž hodnota je odhadována na 1000 Kč. Mezi největší nevýhody prototypu patří enormní velikost superkapacitorového článku. Instalace je možná pouze do podhledů s úložným prostorem.

Hlavním přínosem této diplomové práce byl funkční návrh segmentů, které ovládají a regulují jednotlivé struktury použité v prototypu nouzového svítidla, jako jsou nabíjecí, ovládací a indikační obvody. Teoretické a experimentální výpočty potvrdily, že lze prakticky využít superkapacitor, který napájí 1 W výkonovou LED diodu po dobu stanovenou normou minimálně jednu hodinu. V dalších výzkumech této práce může být sledován vliv superkapacitoru menších kapacit na dobu svícení prototypu nouzového svítidla. Jednotlivé elementy prototypu lze neustále vyvíjet pro vyšší efektivitu celého systému. Tento projekt byl vytvářen v řešitelském týmu pracovníku. Primárně jsem se podílel na vývoji, testování a měření nabíjecího obvodu superkapacitoru a debugování napájecího obvodu pro výkonovou LED diodu. Největší vizí tohoto elektrotechnického prototypu je naskytnutí stále nových technologií v tomto dynamicky rozvíjícím se odvětví.

Odkazy použité literatury, obrázků, tabulek a grafů z vnějších zdrojů

- [1] HABEL, Jiří. A KOLEKTIV. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995, 437 s. ISBN 80-901-9850-3.
- [2] DROZD, David. Nouzové osvětlení 1. část. *Světlo* [online]. roč. 2008, č. 2 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36595
- [3] DROZD, David. Nouzové osvětlení 2. část. *Světlo* [online]. roč. 2008, č. 2 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37036
- [4] DROZD, David. Nouzové osvětlení 3. část. *Světlo* [online]. roč. 2008, č. 3 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37412
- [5] DROZD, David. Nouzové osvětlení 4. část. *Světlo* [online]. roč. 2008, č. 4 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37592
- [6] DROZD, David. Nouzové osvětlení 5. *Světlo* [online]. roč. 2008, č. 5 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37975
- [7] DROZD, David. Nouzové osvětlení 6. *Světlo* [online]. roč. 2008, č. 6 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38298
- [8] KOLEKTIV EXX. Nouzové osvětlení – srovnání systémů s centrálním zdrojem a s decentralizovanými akumulátory. *Světlo* [online]. roč. 2009, č. 5 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39779
- [9] ČSN EN 1838. *Světlo a osvětlení - Nouzové osvětlení*. Praha: Český normalizační institut, 2000, 15 s.
- [10] ČSN EN 50172. *Systémy nouzového únikového osvětlení*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 16 s.
- [11] ČSN EN 60598-2-22. *Svítlidla - Část 2-22: Zvláštní požadavky - Svítlidla pro nouzové osvětlení*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 28 s.
- [12] LED. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>
- [13] Zářivka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99ivka>
- [14] ŽÁK, Petr. Volba osvětlovací soustavy do vznikajícího projektu. *Elektrika.cz* [online]. 2011 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/volba-osvetlovaci-soustavy-do-vznikajiciho-projektu>

- [15] ANDERL, Jan. *Vývoj a realizace automatického dobíječe zdrojů nouzového osvětlení*. České Budějovice, 29.4. 2011. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.
- [16] DUDA, Vlastimil. *Využití superkapacitorů v trakčních pohonech*. Pardubice, 21.5. 2010. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.
- [17] PAVELKA, Vladek. *Rekuperační systém se superkondenzátorem*. Praha, 3.3. 2003. Závěrečná zpráva studijní etapy doktorandského studia. České vysoké učení technické.
- [18] Olověný akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Olov%C4%9Bn%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [19] Nikl-kadmiový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [20] Nikl-metal hydridový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-metal_hydridov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [21] Katalog nouzových svítidel. In: www.legrand.cz [online]. 2010 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.legrand.cz/cz/cz/liblocal/legrand_katalog_nouzova_svitidla_2010.pdf.pdf
- [22] Požadavky nouzového osvětlení. In: www.hormen.cz [online]. 2009 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.hormen.cz/files/aktualita-nouzove-osvetleni/hormen-pozadavky-nouzove-osvetleni.pdf>
- [23] *Superkapacitory*. 2011, 31.5 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Vedoucí práce Petr Polcar.
- [24] Superkapacitor - princip, použití. In: DĚDOUREK, Pavel. [Http://www.dedalebeda.wz.cz](http://www.dedalebeda.wz.cz) [online]. 2007 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.dedalebeda.wz.cz/skola/upload/02FM1/super_capacitor.pdf
- [25] *Superkapacitory*. www.ecom.cz [online]. 2005 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf>
- [26] Maxwell SuperCap. www.maxwell.com [online]. 2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf
- [27] Superkondenzátory. www.tzb-info.cz [online]. 2010 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>
- [28] LTC3490 Datasheet. *Linear technology* [online]. 2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3490fa.pdf>
- [29] LTC4425 Datasheet. *Linear Technology* [online]. 2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/4425f.pdf>

- [30] [Http://elsynn.abb.cz](http://elsynn.abb.cz). *Základní principy moderních zdrojů, jejich bezpečnost a ochrana* [online]. 2010 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://elsynn.abb.cz/obchod/documents/Z%C3%A1kladn%C3%AD%20principy%20modern%C3%ADch%20zdroj%C5%AF.pdf>
- [31] Stabilizovaný zdroj. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Stabilizovan%C3%BD_zdroj
- [32] Datasheet K2 Series Supercapacitors. www.Maxwell.com [online]. 2010 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet_k2_series_1015370.pdf
- [33] Měření křivek svítivosti parabolického svítidla. *Laboratorní úlohy ze světelné a osvětlovací techniky* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/12_Mereni_krivek_svitivosti_parabolickeho_svitidla.pdf
- [34] RESCLITE ESCAPE AD NT1 WH. *Zumtobel* [online]. 2012 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: <http://www.zumtobel.com/com-en/products/1338.html?42177048>
- [35] CARBOL, Zbyněk. Možnosti napájení nouzového osvětlení pomocí superkondenzátorů. *Elektrické světlo*. 2011, č. 1, s. 21.
- [36] Nové možnosti LED technologií v osvětlování. In: *Projekt* [online]. 2012 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.vsb.cz/innet/cs/okruhy/veda-a-vyzkum/sgs/2012/detaily?detail=19721>
- [37] The Virtual Architecture Exhibition. *ArchiExpo* [online]. 2010 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.archiexpo.com/prod/zumtobel/emergency-lights-9003-331202.html>
- [38] Posvítíme.cz. www.posvitime.cz [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.posvitime.cz/faro-t4-15801-w-hog15801>
- [39] Kompaktní zářivky. www.zarovky-svitidla.cz [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.zarovky-svitidla.cz/kanlux-t1u-11w-k--kompaktni-zarivka,331.html>
- [40] Žárovky. [Elektroeden.cz](http://www.elektroeden.cz) [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.elektroeden.cz/zarivka-se-studenou-katodou-a-s-invertorem-300-mm-bila+dp67579/>
- [41] Světlo. [Http://music-shop.vltava2000.cz](http://music-shop.vltava2000.cz) [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://music-shop.vltava2000.cz/store/goods-1104150252-3-led-vykonova-1w-nebo-3w--cira--if-350-nebo-700ma.html>
- [42] Modus. www.modus.cz [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.modus.cz/cze/katalog-svitidel/nouzove-osvetleni/modus-helios/>
- [43] Light. <http://www.rselectroservice.ru> [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.rselectroservice.ru/light/sistemy_centralno-akkumuljatornoj_batareej.php
- [44] Northcliffe. <http://www.northcliffe.org> [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.northcliffe.org/cz/ems_em_cz.html
- [45] Modus. www.modus.cz [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.modus.cz/cze/katalog-svitidel/nouzove-osvetleni/lider/>

- [46] Condrad. *www.condrad.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.condrad.cz/oloveny-akumulator-vrta-panasonic-12-v-24-ah.k255483>
- [47] TME. *www.tme.eu* [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.tme.eu/html/CZ/akumulatorove-baterie-pro-nouzova-osvetleni/ramka_902_CZ_pelny.html
- [48] Battex. *Http://shop.battex.cz/oblasti/ostatni.php* [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://shop.battex.cz/oblasti/ostatni.php>
- [49] Napájecí adaptér. *www.gme.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/napajeci-adaptery-sitove/napajeci-adapter-sitovy-3-3v-2000ma-2-1-mm-p751-111/>
- [50] SOKANSKÝ, Karel. A SPOL. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. 1. ISBN 987-80-01-04941-9.
- [51] TME. *www.tme.eu* [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.tme.eu/en/details/ltc4425emsepbf/battery-and-battery-cells-controllers/linear-technology/ltc4425emse_pbf/#
- [52] Světla-svitidla. *Http://www.svetla-svitidla.cz/* [online]. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.svetla-svitidla.cz/katalog/1-nouzova-svitidla/>

Seznam obrázků a grafů uvedených v diplomové práci

Obr. 1: <i>Blokové schéma druhů nouzového osvětlení</i> [9]	4
Obr. 2: <i>Případy, v nichž je potřeba aplikovat nouzové osvětlení</i> [22]	6
Obr. 3: <i>Požadavky na hodnoty intenzity osvětlení únikových cest</i> [22].....	6
Obr. 4: <i>Požadavky na rovnoměrnost osvětlení únikových cest</i> [22].....	7
Obr. 5: <i>Dosažitelnost požadované hladiny osvětlenosti pro únikové cesty a protipanické prostory</i> [22]	7
Obr. 6: <i>Dosažitelnost požadované hladiny osvětlenosti pro prostory s velkým rizikem</i> [22].....	8
Obr. 7: <i>Moderní nouzová svítidla určené pro různé nouzové prostory</i> [37]	9
Obr. 8: <i>Lineární zářivka používaná v nouzovém svítidle</i> [38].....	10
Obr. 9 <i>Kompaktní zářivka používaná v nouzových svítidlech</i> [39]	11
Obr. 10: <i>Zářivka se studenou katodou používaná v nouzových svítidlech</i> [40].....	11
Obr. 11: <i>Výkonová LED dioda</i> [41]	12
Obr. 12: <i>Klasické nouzové svítidlo</i> [42]	13
Obr. 13: <i>Ukázka monitorovacího systému</i> [44].....	15
Obr. 14: <i>Systém nouzového osvětlení</i> [22].....	15
Obr. 15: <i>Centrální záložní akumulátorový systém</i> [43].....	16
Obr. 16: <i>Klasická zálohovací baterie s předřadníkem a testovacím tlačítkem – invertor</i> [45].....	17
Obr. 17: <i>Olověná baterie používaná v aplikaci centrálního napájení</i> [46].....	18
Obr. 18: <i>Nikl-kadmový článek používaný v autonomním napájecím systému</i> [47]	19
Obr. 19: <i>Nikl-metal hydridová baterie určená pro autonomní systém</i> [48]	19
Obr. 20: <i>Akumulační struktura klasického elektrolytického kondenzátoru a superkapacitoru</i> [25]	21
Obr. 21: <i>Energetická bilance kondenzátoru, superkapacitoru, baterií a palivových článků</i> [27].....	22
Obr. 22: <i>Superkapacitor v nabitém stavu</i> [26]	23
Obr. 23: <i>Vybíjecí charakteristika superkapacitoru</i> [16]	25
Obr. 24: <i>Zobrazení parametrů skutečného superkapacitoru</i>	26
Obr. 25: <i>Samovybíjecí charakteristika superkapacitoru použitého v aplikaci prototypu</i> [35].....	27
Obr. 26: <i>Závislost úbytku naakumulovaného náboje na provozní teplotě</i> [16].....	28
Obr. 27: <i>Teplotní závislost kapacity a vnitřní rezistence</i> [26].....	29
Obr. 28: <i>Závislost účinnosti na vstupní napětí LED driveru LTC3490</i> [34]	31

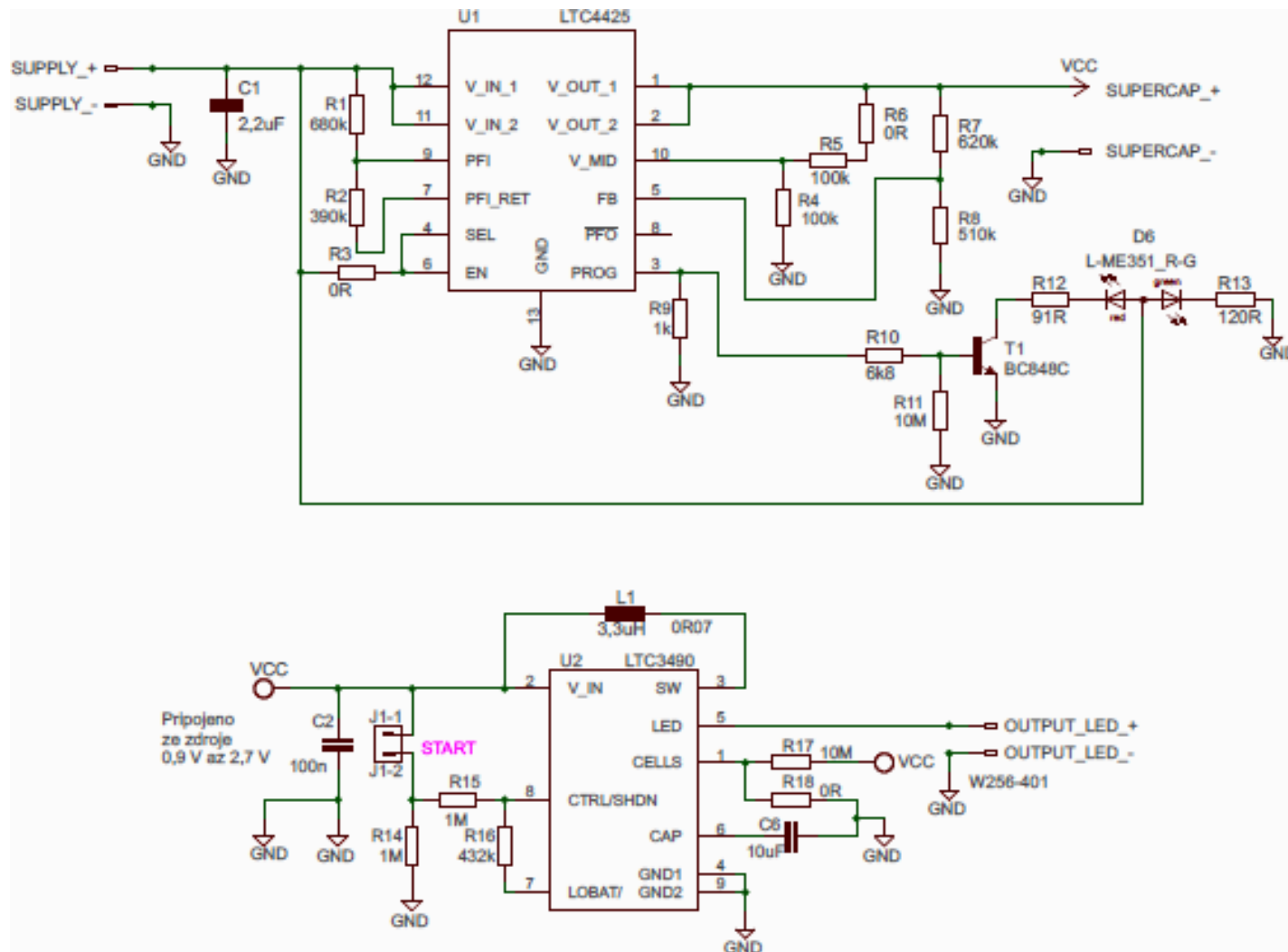
Obr. 29: <i>Blokové schéma prototypu nouzového svítidla</i>	34
Obr. 30: <i>Výstupní projekce plošného spoje nabíjecího a napájecího obvodu</i>	37
Obr. 31: <i>Simulace vybíjení energie a napětí na superkapacitorech</i>	38
Obr. 32: <i>Schéma nabíjecího obvodu v EAGLE</i>	40
Obr. 33: <i>Stabilizovaný napájecí zdroj [49]</i>	40
Obr. 34: <i>Integrovaný obvod LTC4425 [51]</i>	42
Obr. 35: <i>Maxwell BCAP3000 [26]</i>	43
Obr. 36: <i>Napájecí obvod pro výkonovou LED diodu</i>	44
Obr. 37: <i>Vliv rezistivity indukčnosti na napájení LED</i>	45
Obr. 38: <i>Vybíjecí proud superkapacitoru a napájecí proud LED diody</i>	46
Obr. 39: <i>Křivka svítivosti původního svítidla osazeného 5 W diodou a kryt prototypu firmy Zumtobel [34]</i>	48
Obr. 40: <i>Úprava optické části svítidla pro měření křivek svítivosti prototypu nouzového svítidla</i>	49
Obr. 41: <i>Způsob měření křivek svítivosti prototypu [33]</i>	50
Obr. 42: <i>Křivka svítivosti prototypu nouzového svítidla</i>	52
Obr. 43: <i>Reálné nabíjení superkapacitoru inteligentní nabíječkou</i>	53
Obr. 44: <i>Reálné vybíjení superkapacitoru 1W výkonovou LED diodou</i>	54
Obr. 45: <i>3D projekce chodby v prostorech kolejí VŠB</i>	55
Obr. 46: <i>Požadovaná intenzita osvětlení 1 lx v maximální vzdálenosti dvou prototypů</i>	56
Obr. 47: <i>Požadovaná intenzita osvětlení 1 lx v maximální vzdálenosti dvou nouzových svítidel Zumtobel</i>	56
Obr. 48: <i>Virtuální schéma na měření maximální vzdálenosti</i>	57
Obr. 49: <i>Srovnání světelného toku a osvětlené vzdálenosti prototypu</i>	59
Obr. 50: <i>Rozměry superkapacitoru Maxwell BCAP3000 [32]</i>	61

Seznam použitých tabulek uvedených v diplomové práci

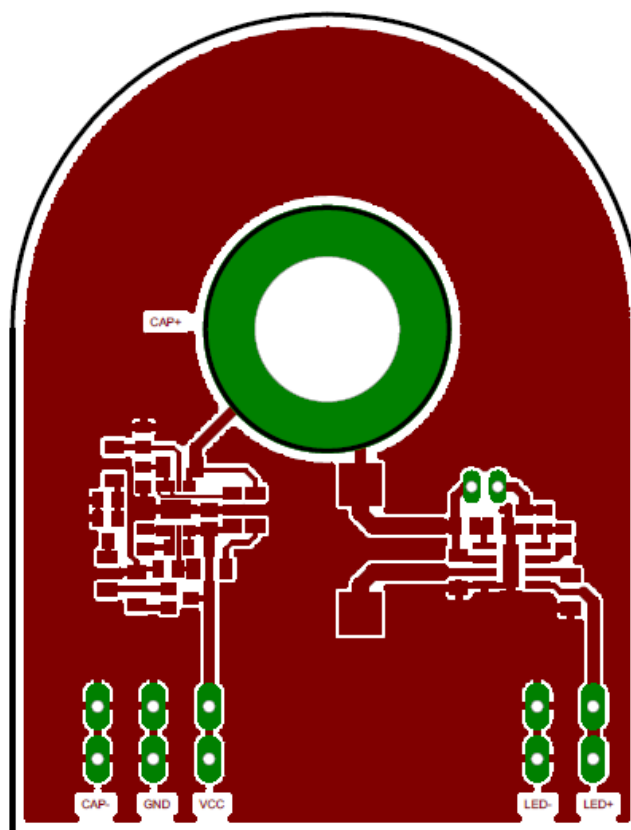
Tab. 1: <i>Limity omezujícího oslnění</i> [9].....	8
Tab. 2 <i>Ukázka finančního porovnání centrálního a decentralizovaného řešení devítipatrového objektu</i> [5].....	14
Tab. 3: <i>Finanční srovnání centrálního a autonomního systému</i> [8]	18
Tab. 4 <i>Výkonově-technické srovnání zdrojů elektrické energie</i> [17]	19
Tab. 5: <i>Degradace a nárůst ESR v závislosti na provozním napětím a teplotou</i> [26].....	30
Tab. 6: <i>Parametry napájecího zdroje</i> [49]	41
Tab. 7: <i>Výrobní parametry superkapacitoru Maxwell BCAP300</i> [32].....	44
Tab. 8: <i>Hodnoty napětí na superkapacitoru a LED diodě po 114 minutách</i>	45
Tab. 9: <i>Ukázka měření osvětlenosti prototypu nouzového svítidla</i>	50
Tab. 10: <i>Ukázka výpočtu svítivosti prototypu nouzového svítidla</i>	51
Tab. 11: <i>Experimentálně vypočítané hodnoty maximálních a minimálních hodnot osvětlenosti</i>	58
Tab. 12: <i>Finanční a světelně-technické srovnání autonomního nouzového osvětlení</i> [37], [52]	62

Seznam příloh

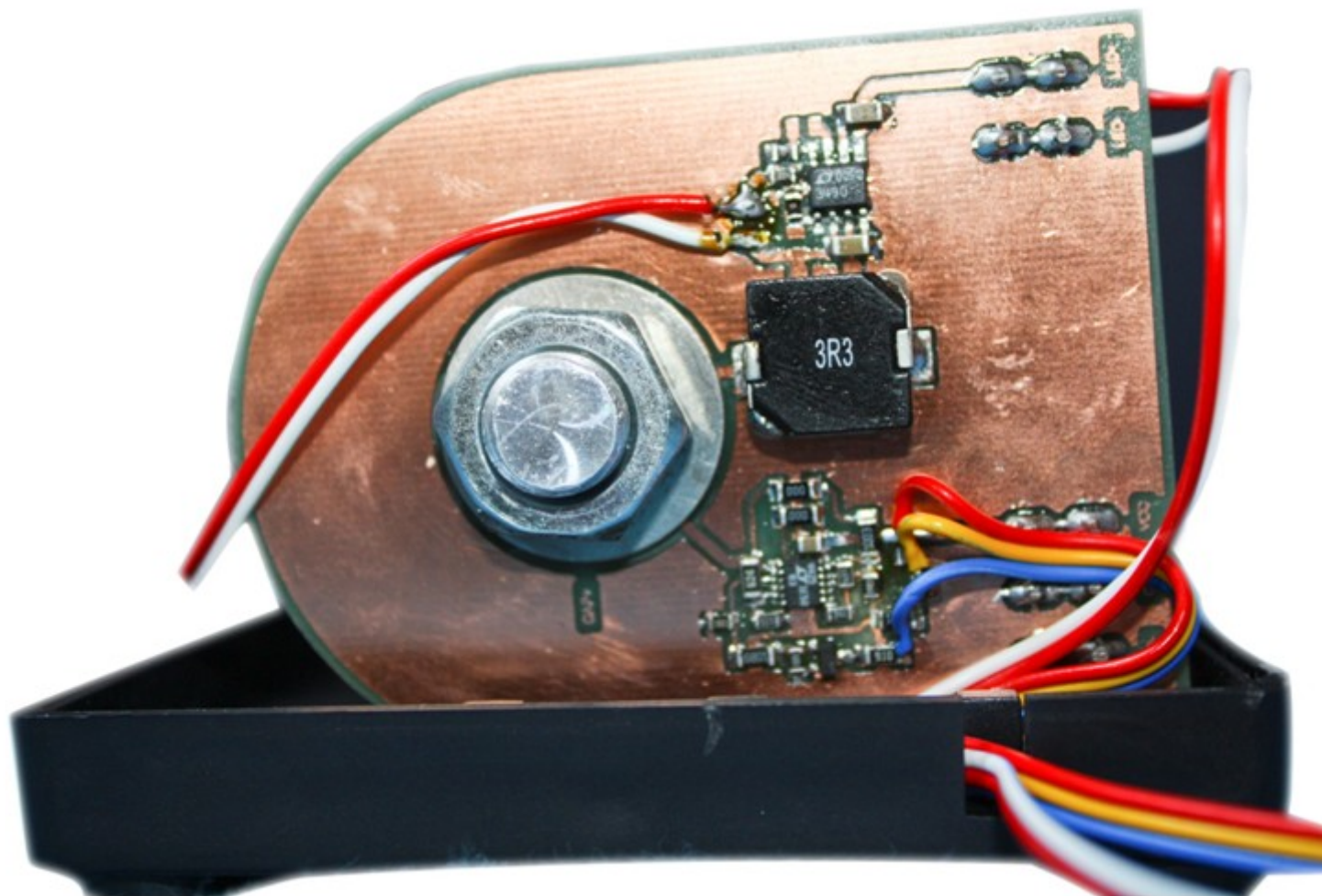
Příloha č.1: Návrh elektronického zapojení v software EAGLE	74
Příloha č.2: Návrh plošného spoje v software EAGLE	75
Příloha č.3: Fotodokumentace plošného spoje zprostředkující elementární funkce	76
Příloha č.4: Fotodokumentace způsobu ukotvení superkapacitoru a plošného spoje v ochranné krabici	77
Příloha č.5: Fotodokumentace konceptu prototypu samostatného nouzového svítidla	78
Příloha č.6: Měření napětí na výkonové LED diodě a superkapacitoru při rezistivitě 3,3 mOhm	79
Příloha č.7: Měření napětí na výkonové LED diodě a superkapacitoru při rezistivitě 6,6 mOhm	80
Příloha č.8: Měření napětí na výkonové LED diodě a superkapacitoru při rezistivitě 8,8 mOhm	81
Příloha č.9: Simulace vybíjení jednoho superkapacitoru	82
Příloha č.10: Simulace vybíjení dvou superkapacitorů v sériovém zapojení	83
Příloha č.11: Simulace vybíjení dvou superkapacitorů v paralelním zapojení	84
Příloha č.12: Souhrn vybíjení superkapacitorů	85

Příloha č. 1: Návrh elektronického zapojení v software EAGLE

Příloha č. 2: Návrh plošného spoje v software EAGLE



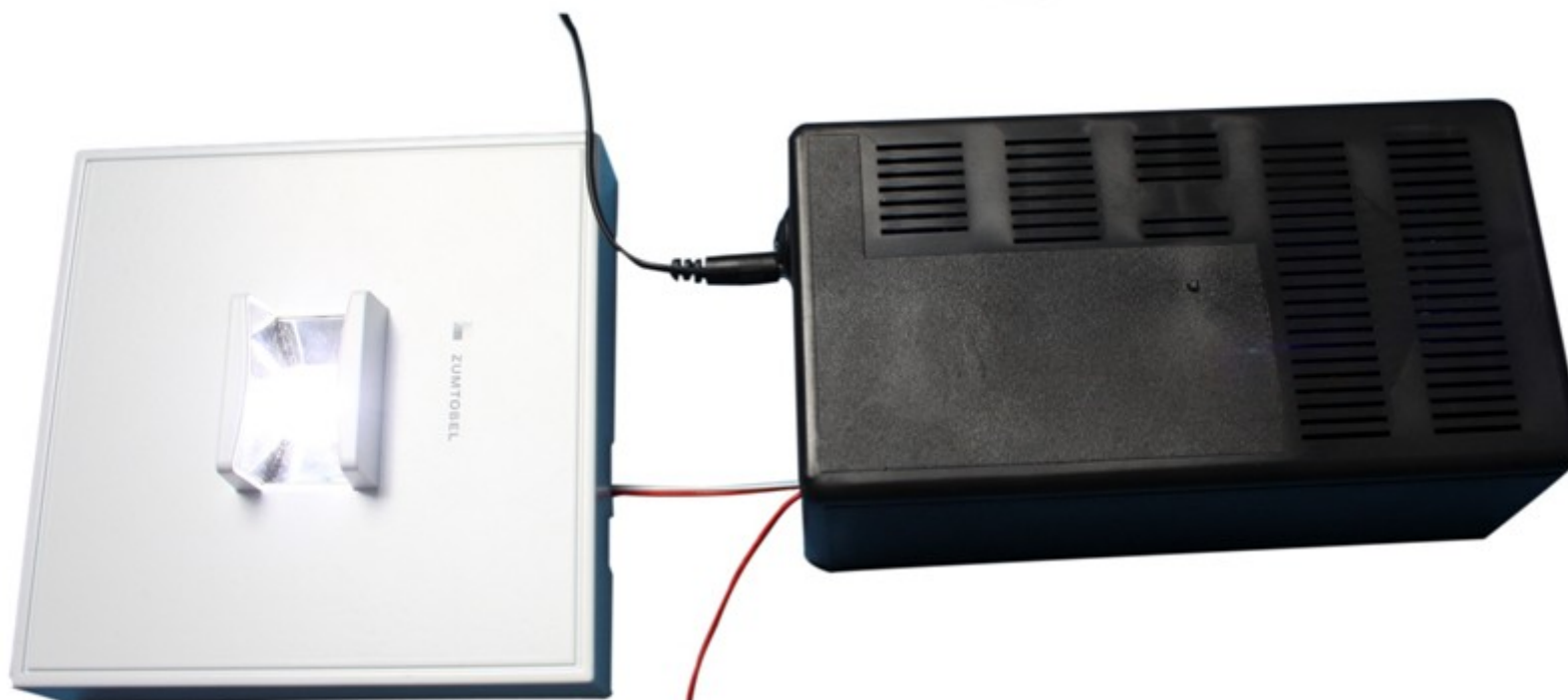
Příloha č. 3: Fotodokumentace plošného spoje zprostředkující elementární funkce



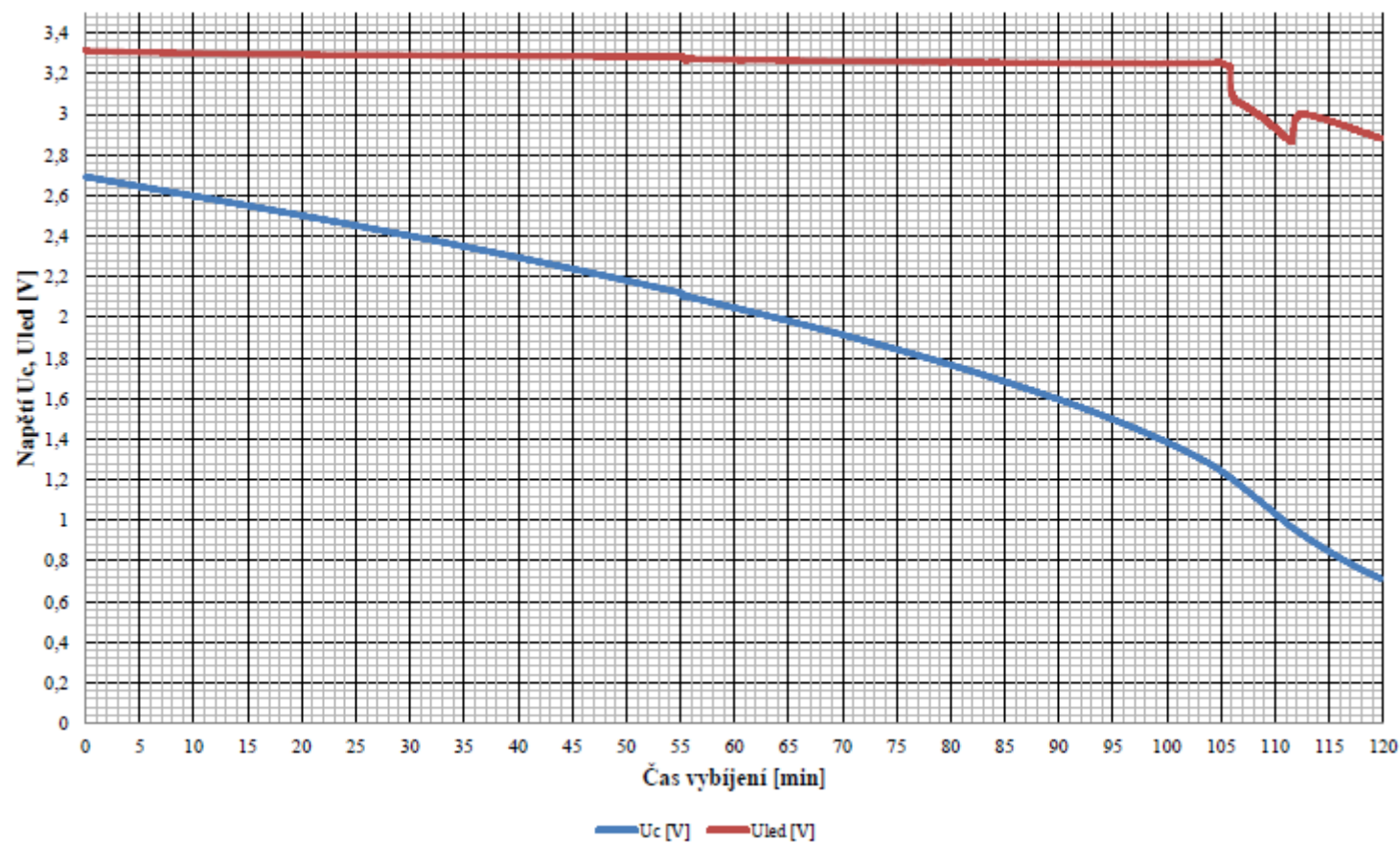
Příloha č. 4: Fotodokumentace způsobu ukotvení superkapacitoru a plošného spoje v ochranné krabici

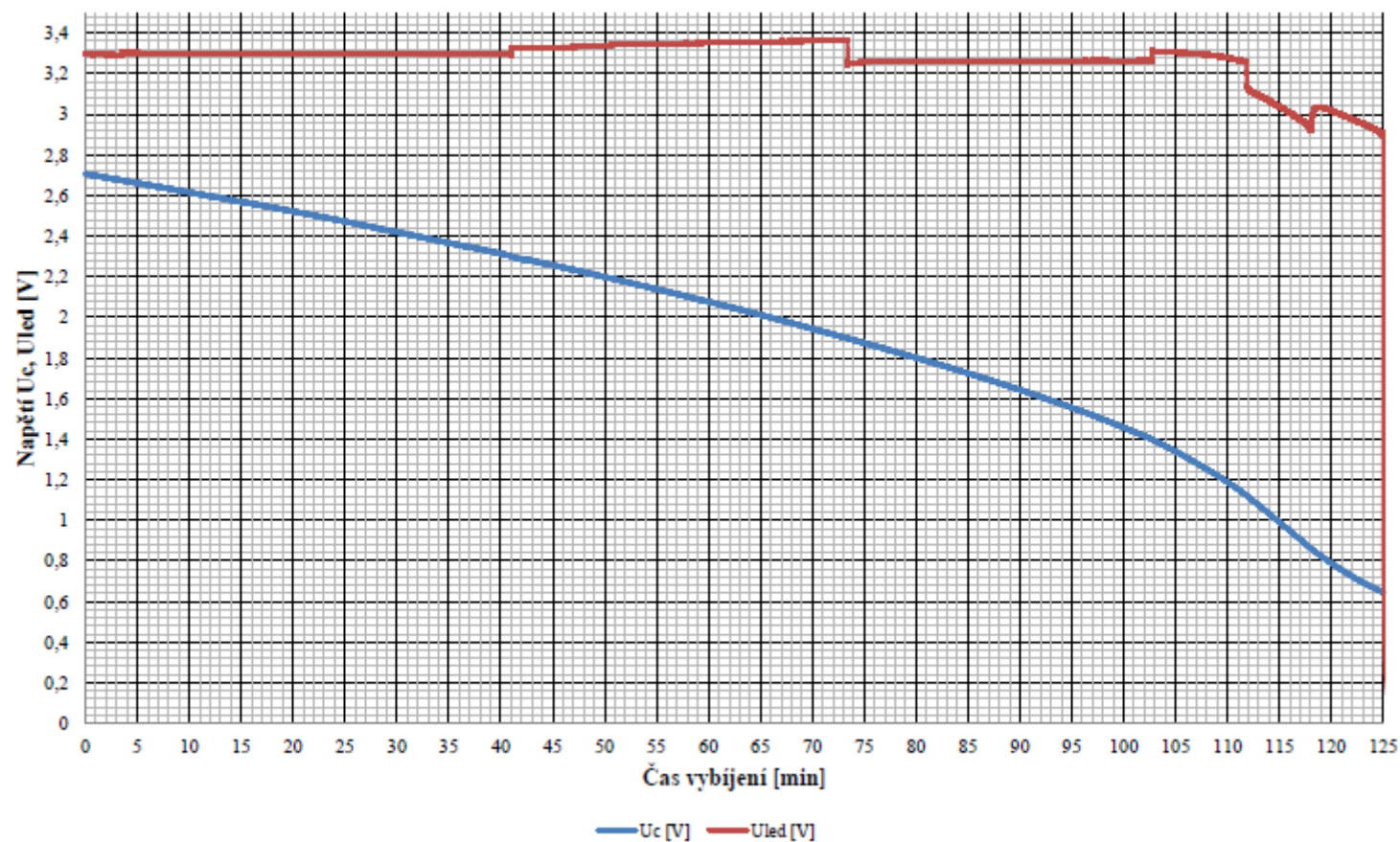


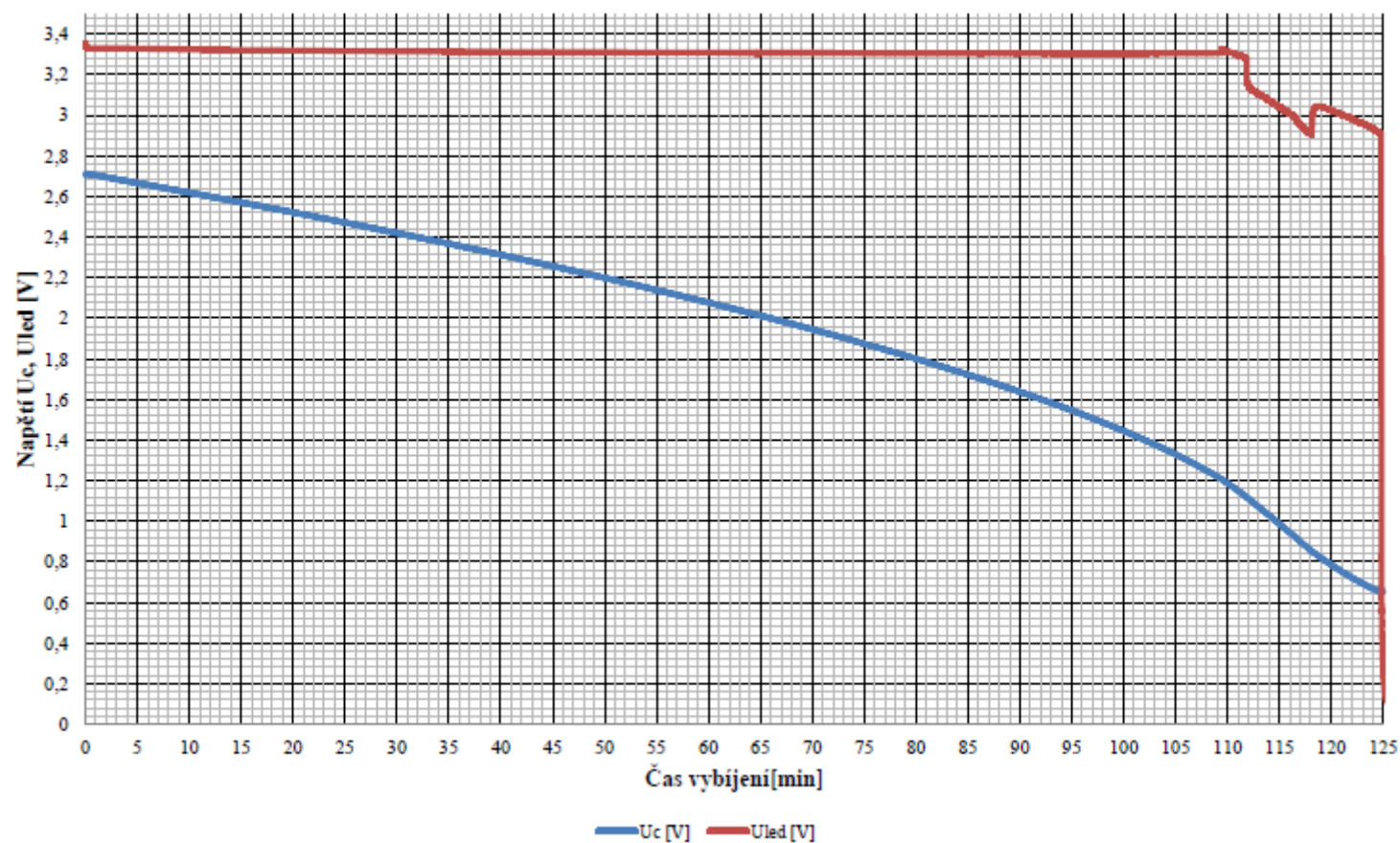
Příloha č. 5: Fotodokumentace konceptu prototypu samostatného nouzového svítidla



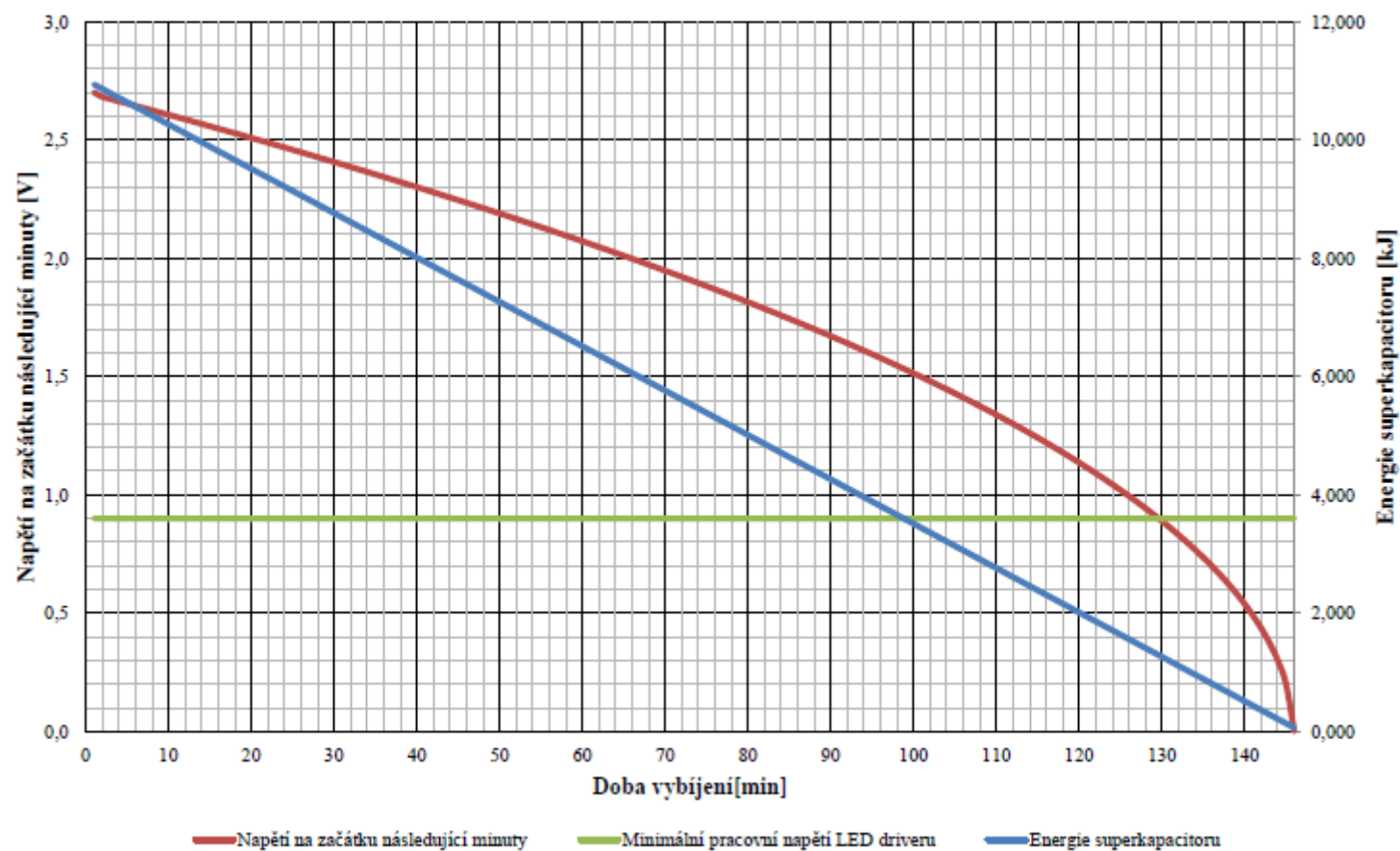
Příloha č. 6: Měření napětí na výkonové LED diodě a superkapacitoru při rezistivitě 3,3 mOhm

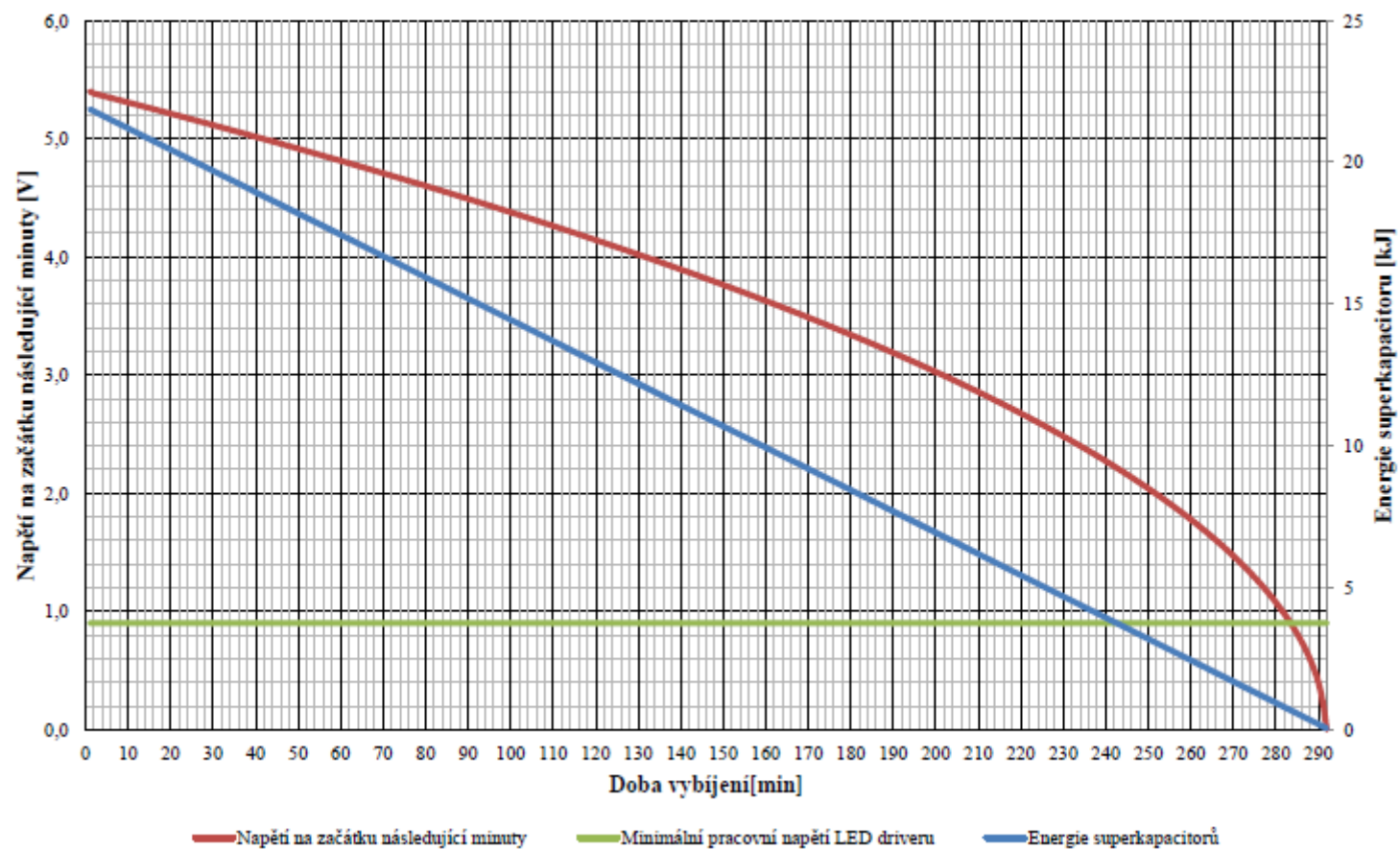


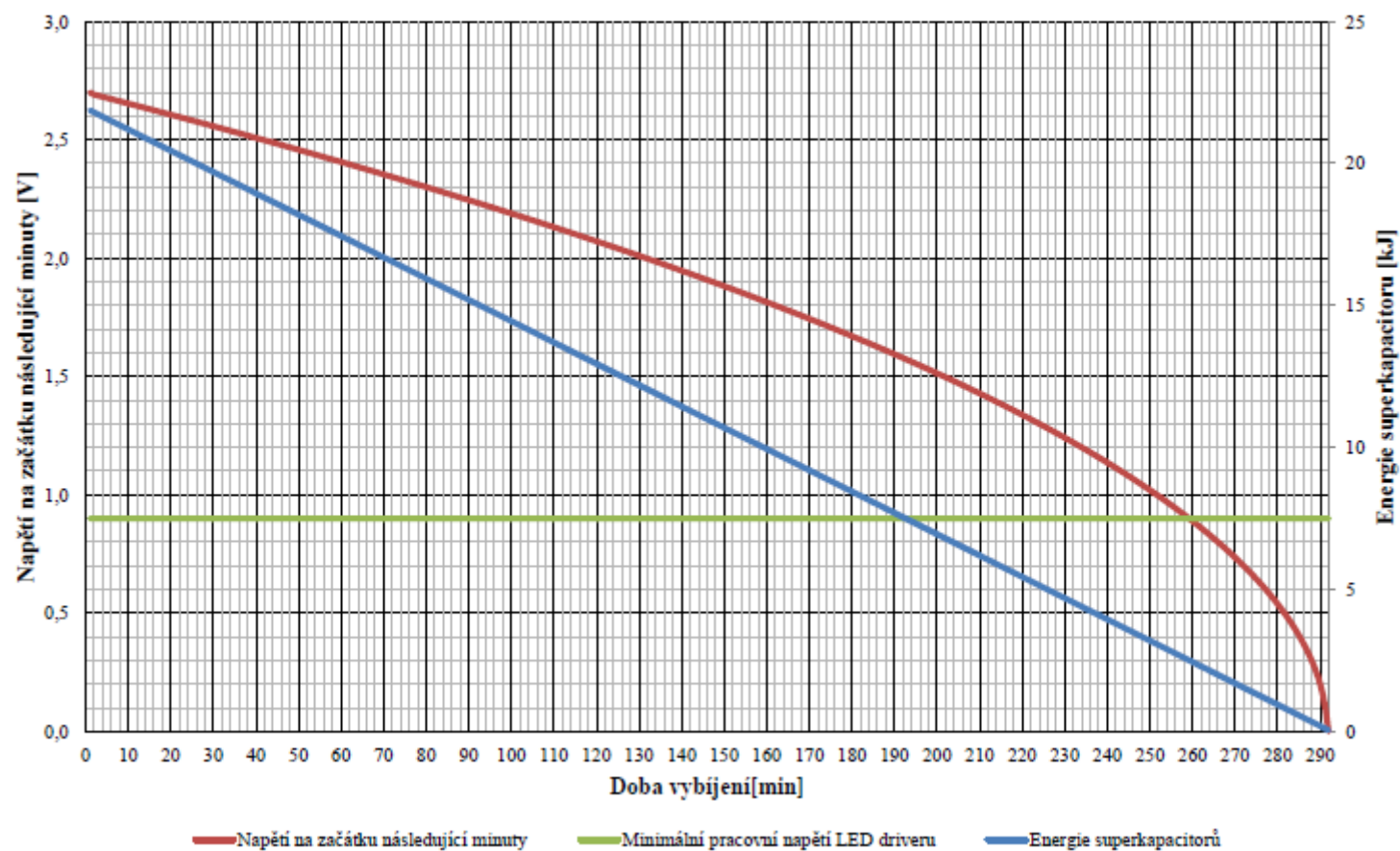
Příloha č. 7: Měření napětí na výkonové LED diodě a superkapacitoru při rezistivitě 6,6 mOhm

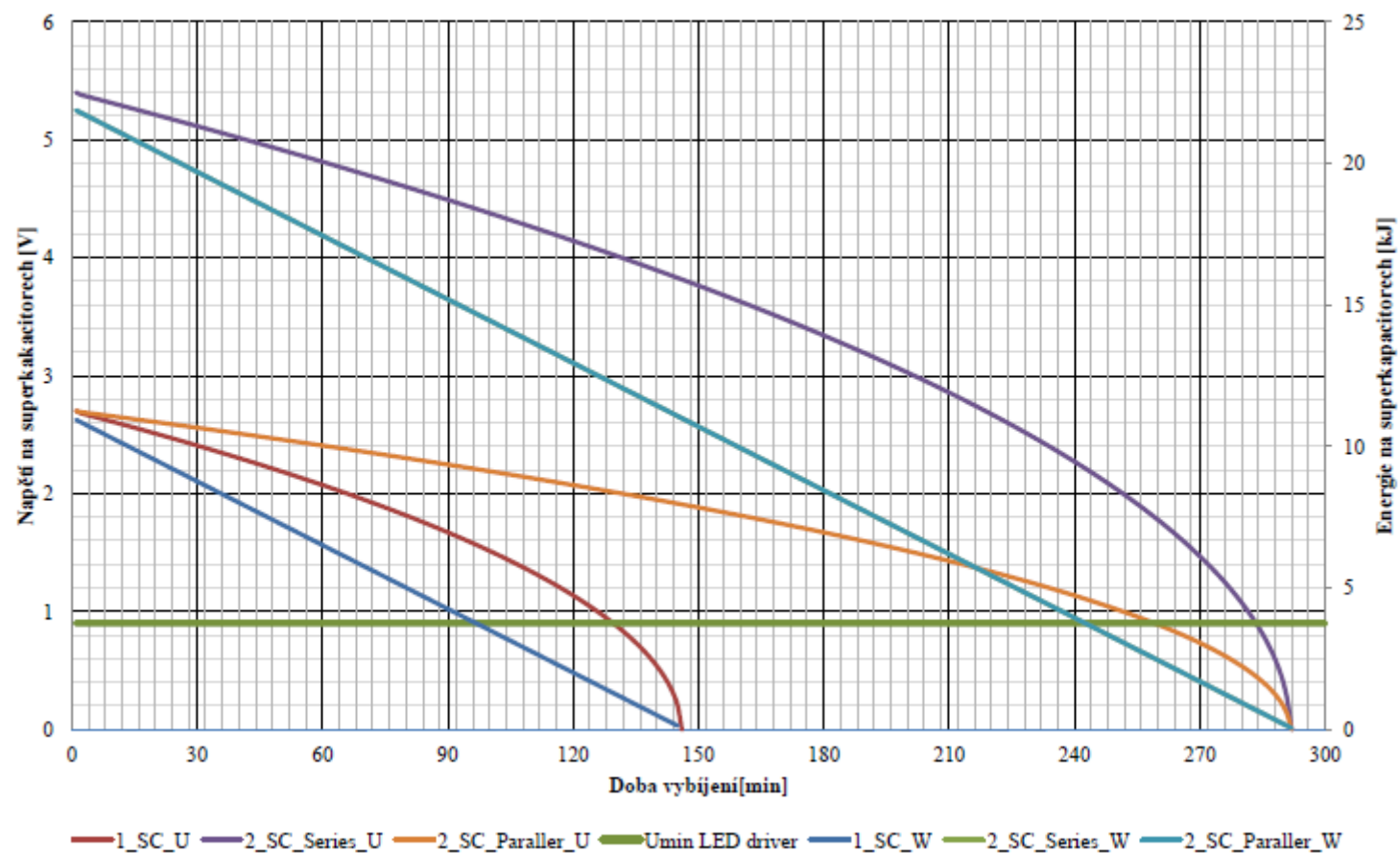
Příloha č. 8: Měření napětí na výkonové LED diodě a superkapacitoru při rezistivitě 8,8 mOhm

Příloha č. 9: Simulace vybíjení jednoho superkapacitoru



Příloha č. 10: Simulace vybíjení dvou superkapacitorů v sériovém zapojení

Příloha č. 11: Simulace vybíjení dvou superkapacitorů v paralelním zapojení

Příloha č. 12: Souhrn vybíjení superkapacitorů

Příloha č. 13: Tabulka hodnot osvětlenosti prototypu nouzového svítidla

		Měřená rovina [°]																							
Úhlový interval [°]	α [°]	Osvětlenost [lx]																							
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
	0	24	24	25	26	26	26	23	26	26	26	25	24	24	24	25	26	26	23	26	26	26	26	25	24
	5	19	19	19	21	22	23	23	23	22	21	19	19	19	19	19	21	22	23	23	23	22	21	19	19
	10	16	16	16	16	18	21	24	21	18	16	16	16	16	16	16	18	21	24	21	18	16	16	16	16
	15	14	14	15	16	16	17	27	17	16	16	15	14	14	14	15	16	16	17	27	17	16	16	15	14
	20	11	12	13	15	16	16	29	16	16	15	13	12	11	12	13	15	16	16	29	16	16	15	13	12
	25	10	10	12	14	16	17	32	17	16	14	12	10	10	10	12	14	16	17	32	17	16	14	12	10
	30	5	7	10	13	15	16	34	16	15	13	10	7	5	7	10	13	15	16	34	16	15	13	10	7
	35	2	2	5	11	15	16	36	16	15	11	5	2	2	2	5	11	15	16	36	16	15	11	5	2
	40	2	2	2	9	14	16	40	16	14	9	2	2	2	2	9	14	16	40	16	14	9	2	2	2
	45	1	2	2	3	14	18	48	18	14	3	2	2	1	2	2	3	14	18	48	18	14	3	2	2
	50	0	1	2	2	15	20	61	20	15	2	2	1	0	1	2	2	15	20	61	20	15	2	2	1
	55	0	0	2	2	14	25	83	25	14	2	2	0	0	0	2	2	14	25	83	25	14	2	2	0
	60	0	0	0	3	9	31	114	31	9	3	0	0	0	0	0	3	9	31	114	31	9	3	0	0
	65	0	0	0	4	10	44	163	44	10	4	0	0	0	0	0	4	10	44	163	44	10	4	0	0
	70	0	0	0	3	16	58	193	58	16	3	0	0	0	0	0	3	16	58	193	58	16	3	0	0
	75	0	0	0	0	23	55	90	55	23	0	0	0	0	0	0	0	23	55	90	55	23	0	0	0
	80	0	0	0	0	7	14	26	14	7	0	0	0	0	0	0	0	7	14	26	14	7	0	0	0
	85	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0
	90	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Příloha č. 14: Tabulka hodnot svítivosti prototypu nouzového svítidla

	α [°]	Měřená rovina [°]																							
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
Úhlový interval [°]	0	201,8	201,8	210,3	218,7	218,7	218,7	193,4	218,7	218,7	218,7	210,3	201,8	201,8	201,8	210,3	218,7	218,7	218,7	193,4	218,7	218,7	218,7	210,3	201,8
	5	159,8	159,8	159,8	176,6	185	193,4	193,4	193,4	185	176,6	159,8	159,8	159,8	159,8	159,8	176,6	185	193,4	193,4	193,4	185	176,6	159,8	159,8
	10	134,6	134,6	134,6	134,6	151,4	176,6	201,8	176,6	151,4	134,6	134,6	134,6	134,6	134,6	134,6	134,6	151,4	176,6	201,8	176,6	151,4	134,6	134,6	134,6
	15	117,7	117,7	126,2	134,6	134,6	143	227,1	143	134,6	134,6	126,2	117,7	117,7	117,7	126,2	134,6	134,6	143	227,1	143	134,6	134,6	126,2	117,7
	20	92,5	100,9	109,3	126,2	134,6	134,6	243,9	134,6	134,6	126,2	109,3	100,9	92,5	100,9	109,3	126,2	134,6	134,6	243,9	134,6	134,6	126,2	109,3	100,9
	25	84,1	84,1	100,9	117,7	134,6	143	269,1	143	134,6	117,7	100,9	84,1	84,1	84,1	100,9	117,7	134,6	143	269,1	143	134,6	117,7	100,9	84,1
	30	42,1	58,9	84,1	109,3	126,2	134,6	285,9	134,6	126,2	109,3	84,1	58,9	42,1	58,9	84,1	109,3	126,2	134,6	285,9	134,6	126,2	109,3	84,1	58,9
	35	16,8	16,8	42,1	92,5	126,2	134,6	302,8	134,6	126,2	92,5	42,1	16,8	16,8	16,8	42,1	92,5	126,2	134,6	302,8	134,6	126,2	92,5	42,1	16,8
	40	16,8	16,8	16,8	75,7	117,7	134,6	336,4	134,6	117,7	75,7	16,8	16,8	16,8	16,8	75,7	117,7	134,6	336,4	134,6	117,7	75,7	16,8	16,8	16,8
	45	8,4	16,8	16,8	25,2	117,7	151,4	403,7	151,4	117,7	25,2	16,8	16,8	8,4	16,8	16,8	25,2	117,7	151,4	403,7	151,4	117,7	25,2	16,8	16,8
	50	0	8,4	16,8	16,8	126,2	168,2	513	168,2	126,2	16,8	16,8	8,4	0	8,4	16,8	16,8	126,2	168,2	513	168,2	126,2	16,8	16,8	8,4
	55	0	0	16,8	16,8	117,7	210,3	698	210,3	117,7	16,8	16,8	0	0	0	16,8	16,8	117,7	210,3	698	210,3	117,7	16,8	16,8	0
	60	0	0	0	25,2	75,7	260,7	958,7	260,7	75,7	25,2	0	0	0	0	25,2	75,7	260,7	958,7	260,7	75,7	25,2	0	0	0
	65	0	0	0	33,6	84,1	370	1371	370	84,1	33,6	0	0	0	0	33,6	84,1	370	1371	370	84,1	33,6	0	0	0
	70	0	0	0	25,2	134,6	487,8	1623	487,8	134,6	25,2	0	0	0	0	25,2	134,6	487,8	1623	487,8	134,6	25,2	0	0	0
	75	0	0	0	0	193,4	462,6	756,9	462,6	193,4	0	0	0	0	0	0	193,4	462,6	756,9	462,6	193,4	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	58,9	117,7	218,7	117,7	58,9	0	0	0	0	0	0	58,9	117,7	218,7	117,7	58,9	0	0	0	0
	85	0	0	0	0	8,4	8,4	16,8	8,4	8,4	0	0	0	0	0	0	8,4	8,4	16,8	8,4	8,4	0	0	0	0
	90	0	0	0	0	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	0	0	0	0	0	0	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	0	0	0	0
	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0